INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

PLANEAMENTO E OPTIMIZAÇÃO EM REDES CELULARES MÓVEIS AUTO-GERIDAS ASSENTES EM LTE

Marco António Lourenço Carvalho
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Vogal - Arguente: Doutor António José Castelo Branco Rodrigues

Vogal - Orientador: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Novembro 2011

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores

PLANEAMENTO E OPTIMIZAÇÃO EM REDES CELULARES MÓVEIS AUTO-GERIDAS ASSENTES EM LTE

Marco António Lourenço Carvalho
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Vogal - Arguente: Doutor António José Castelo Branco Rodrigues

Vogal - Orientador: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Novembro 2011

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio, colaboração e compreensão das pessoas que são dispostas de seguida. A todos eles gostaria de exprimir a minha enorme gratidão e reconhecer-lhes o elevado contributo que deram à concretização deste trabalho.

Ao Instituto de Telecomunicações pelo interesse e apoio que deu no desenvolvimento e divulgação deste trabalho.

À Celfinet e em especial ao Eng. Luís Varela pela compreensão e apoio que deu ao longo da realização deste trabalho.

À Vodafone Portugal e em especial ao Eng. Carlos Caseiro, Eng. Raul Almeida e Eng. Luís Chaves que tornaram possível contributo desta neste trabalho.

Ao Eng. Pedro Vieira pela oportunidade, orientação, amizade e acima de tudo pela confiança que transmitiu desde o primeiro contacto.

Ao Eng. Ricardo Reis pelo apoio e incentivo que transmitiu desde os primeiros passos desta longa caminhada.

À Janice Ferreira pela enorme compreensão, paciência e ajuda que deu e que toda a diferença fez nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, Olinda Lourenço, por, a partir de tão pouco, ter feito tanto por mim e tornar-me no homem que sou hoje.

Ao Carlos Sousa por em poucas palavras me ter dado um novo fôlego na recta da meta.

A todos aqueles que não foram mencionados acima mas que de forma directa ou indirecta contribuiram para a realização deste trabalho. A todos eles, o meu obrigado!

Abstract

The aim of this work is to evaluate the benefits of the Self-Organizing Networks (SON), with regard to planning and optimization in Long Term Evolution (LTE) networks, not only through its study but also through the development and testing of algorithms that assess the functioning of some of its main functions.

The accomplished study on SON allowed the identification of a set of functions, such as automatic Physical Cell Id (PCI) assignment, Automatic Neighbour Relation (ANR) and automatic handover parameter optimization that can ease or even replace some of the most common tasks in mobile network planning and optimization, in particular, LTE networks.

Using an open source, Matlab® based, LTE simulator, available for academic research, a set of algorithms, which allow the implementation of the functions in question, were developed.

In addition to the implemented functions, a set of changes, which give this simulator the ability to represent and simulate real networks were also introduced, allowing a more coherent analysis of the developed algorithms.

The obtained results, beyond clearly showing the benefit of the developed algorithms, were also compared with those obtained by the professional planning and optimization tool, Atoll®, verifying a close performance level in some functions.

Finally, a graphical interface was developed that allows the design, configuration, simulation and data analysis of the considered scenarios.

Keywords

Wireless Communications, Planning, Optimization, Operation, Self-Configuration, Self-Optimization, LTE, SON

Resumo

O objectivo deste trabalho consiste em avaliar os benefícios das *Self-Organizing Networks* (SON), no que concerne ao planeamento e optimização de redes *Long Term Evolution* (LTE), não só através do seu estudo, como também através do desenvolvimento e teste de algoritmos, que permitem avaliar o funcionamento de algumas das suas principais funções.

O estudo efectuado sobre as SON permitiu identificar um conjunto de funções, tais como a atribuição automática de *Physical Cell Id* (PCI), o *Automatic Neighbour Relation* (ANR) e a optimização automática de parâmetros de *handover*, que permitem facilitar ou mesmo substituir algumas das tarefas mais comuns em planeamento e optimização de redes móveis celulares, em particular, redes LTE.

Recorrendo a um simulador LTE destinado à investigação académica, em código aberto e desenvolvido em Matlab®, foi desenvolvido um conjunto de algoritmos que permitiram a implementação das funções em questão. Para além das funções implementadas, foram também introduzidas alterações que conferem a este simulador a capacidade de representar e simular redes reais, permitindo uma análise mais coerente dos algoritmos desenvolvidos.

Os resultados obtidos, para além de evidenciarem claramente o benefício dos algoritmos desenvolvidos, foram ainda comparados com os obtidos pela ferramenta profissional de planeamento e optimização Atoll®, tendo-se verificado a franca proximidade de desempenho em algumas das funções.

Finalmente, foi desenvolvida uma interface gráfica que permite o desenho, configuração e simulação de cenários, bem como a análise de resultados.

Palavras-chave

Comunicações *Wireless*, Planeamento, Optimização, Auto-Configuração, Auto-Optimização, LTE, SON

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

Índice de Equações

Acrónimos

2G	2ª Geração
3G	3ª Geração
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ANR	Automatic Neighbour Relation
ANRF	Automatic Neighbour Relation Function
BCCH	Broadcast Control CHannel
BCH	Broadcast CHannel
BER	Bit Error Rate
BLER	BLock Error Rate
BSIC	Base Station Identity Code
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	CAPital EXpenditure
CAZAC	Constant Amplitude Zero Auto-Correlation
CCCH	Common Control CHannel
CDMA	Code Division Multiple Access
CDR	Call Drop Rate
CGI	Cell Global Identity
CINR	Carrier to Interference plus Noise Ratio
CN	Core Network
CQI	Channel Quality Indicator
CR	Contention Rate
CRS	Cell-specific Reference Signal
CS	Circuit Switch
CSFB	Circuit Switched Fall Back
CTC	Convolutional Turbo Coding

DCCH	Dedicated Control CHannel
DCH	Dedicated CHannel
DFT	Discrete Fourrier Transform
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DL-SCH	Downlink Shared CHannel
DMR	Detection Miss Ratio
DNS	Domain Name System
DTCH	Dedicated Traffic CHannel
EMS	Element Mangement System
ECGI	Envolved Cell Global Identifier
ECM	Connection Management
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNB	evolved NodeB
eNodeB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved-UTRAN
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
FSS	Frequency Selective Scheduling
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GIS	Geographic Information System
GPRS	General packet radio service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	Generic Tunneling Protocol
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HLR	Home Location Register
HO	Handover
HPI	Handover Performance Indicator
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access

HSS	Home Subscription Server
HW	HardWare
ICIC	Inter-Cell Interference Control
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
ISI	Inter-Symbol Interference
Itf-N	North Bound Interface
KPI	Key Performance Indicator
LAC	Local Area Code
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Acces Control
MAPL	Maximum Allowable Path Loss
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCCH	Multicast Control CHannel
MCH	Multicast CHannel
MCL	Minimum Coupling Loss
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MLB	Mobility Load Balancing
MME	Mobility Management Entity
MRC	Maximum Rádio Combining
MRM	Measurement Report Message
MRO	Mobility Robustness Optimization
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non-Access Stratum
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NMS	Network Management System
NR	Neighbour Relation
NRT	Neighbour Relation Table
O&M	Operation & Maitenance
OAM	Operation Aministration and Maitenance

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Muliple Access
OPEX	OPerational EXpenditure
PA	Power Amplifier
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast CHannel
PCCH	Paging Control CHannel
PCEF	Policy Control Enforcement Function
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging CHannel
PCI	Physical Cell Identity
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared CHannel
PDSCH/PUSCH	Physical Downlink/Uplink Shared CHannel
P-GW	Pdn GateWay
PHICH	Physical Hybrid-ARQ Indicator CHannel
PLMN	Public Land Mobile Network
PMCH	Physical Multicast CHannel
PN	Pseudo-Noise
PRACH	Physical Random Access CHannel
PRB	Physical Resource Block
PS	Packet Switched
PSC	Primary Scrambling Code
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control CHannel
PUSCH	Physical Uplink Shared CHannel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality Of Service

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAC	Routing Area Code
RACH	Random Access CHannel
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
RLF	Radio Link Failure
RNC	Radio Network Controller
ROI	Region Of Interest
RRC	Radio Resource Controller
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
S1-U	S1 User Plane Interface
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SCH	Synchronization CHannel
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SD	Switch Diversity
SFR	Soft Frequency Reuse
S-GW	Serving GateWay
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SOCRATES	Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelEss networkS
SON	Self Organizing Networks
SSS	Secondary Synchronization Signal
TA	Tracking Area
TAC	Tracking Area Code
TAI	Tracking Area Identifier
TAO	Tracking Area Optimization

TAP	Tracking Area Planning
TAU	Tracking Area Update
TCI	Target Cell Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
TTT	Time-To-Trigger
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL-SCH	Uplink Shared CHannel
UMTS	Universal Terrestrial Radio Access Network
URS	UE-specific Reference Signal
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Lista de Símbolos

$N_{ID}^{(1)}$	*Physical Cell Identity Group*
$N_{ID}^{(2)}$	*Physical Layer Identity*
E_b	Energia de Bit
N_t	Ruído térmico
$L_{UL,pmax}$	Perdas máximas por atenuação numa transmissão em *uplink*
$P_{TX,ref}$	Potência de transmissão por RB
S_{eNodeB}	Sensibilidade de um eNodeB
B_{IUL}	Margem de interferência no *uplink*
B_{LNF}	Margem de desvanecimento log-normal
L_{BL}	Perdas corporais
L_{CPL}	Perdas por penetração em carros
L_{BPL}	Perdas por penetração em edifícios
G_a	Somatório do ganho da BTS e UE
L_J	Perdas provocadas por guias de onda
$P_{TX,UE}$	Potência de transmissão de um UE
N^{RB}	Número de RBs
NF_{eNodeB}	*Noise Figure* do eNodeB
TN	Ruído térmico
Δf	Espaçamento entre sub-portadoras
$SINR_{REQ}$	SINR mínimo
$L_{DL,pmax}$	Perdas máximas por atenuação numa transmissão em *downlink*
S_{UE}	Sensibilidade do UE
B_{IDL}	Margem de interferência no *downlink*
$P_{TX,BTS}$	Potência de transmissão da BTS
BW	Largura de banda do canal

$\mathrm{RSRP_{c,ue}}$	RSRP da célula de serviço para o UE
$\mathrm{P_c}$	Potência transmitida pela célula de serviço
$\mathrm{L_{pl}}$	Perdas de percurso entre BTS e UE
$\mathrm{L_{sf}}$	Perdas por difracção com uma distribuição log-normal e desvio padrão de 3dB
$\mathrm{SINR_{ue}}$	SINR medido no UE
$\mathrm{RSRP_{conn}}$	RSRP da célula de serviço para o user equipment
$\mathrm{RSRP_{int,noise}}$	RSRP das células interferentes
$\mathrm{HPI_{HOF}}$	*Handover Performance Indicator*, *Handover Failure Rate*
$\mathrm{N_{HOfail}}$	Número de *handovers* falhados
$\mathrm{N_{HOatmp}}$	Número de tentativas de *handover*
$\mathrm{N_{HOsucc}}$	Número de *handovers* realizados com sucesso
$\mathrm{N_{HOfail}}$	Número de falhas de *handover*
$\mathrm{HPI_{HPP}}$	Handover Performance Indicator, Handover Ping-Pong
$\mathrm{N_{HOpp}}$	Número de *handovers* com oscilação
$\mathrm{N_{HOnpp}}$	Número de *handovers* sem oscilação
$\mathrm{HPI_{DC}}$	*Handover Performance Indicator*, *Drop Call*
$\mathrm{N_{dropped\ call}}$	Número de chamadas falhadas
$\mathrm{N_{acceptable\ call}}$	Número de chamadas aceites
$Pathloss_{Total}$	Perdas totais
$Pathloss$	Perdas por atenuação
G_{Tx}	Ganho de transmissão
G_{Rx}	Ganho de recepção
MCL	Perdas mínimas entre emissor e receptor
Pwr_{Rx}	Potência de recepção
Pwr_{Tx}	Potência de transmissão
$\mathrm{RSRP_{i,ue}}$	RSRP da célula interferente
Q_{hys}	Margem de histerese
Q_{offset}	Margem de o*ffset*
$\mathrm{RSRP_{avg}}$	RSRP médio
nT	Número de TTIs

N	Número de amostras
$delta_{(v,v_{max},s)}$	Limiar *delta*
v	Velocidade de um UE
v_{max}	Velocidade do UE mais rápido
s	Tipo de serviço
PL	Perdas de percurso
P_{RACH}	Potência de transmissão do preâmbulo
P_{max}	Potência máxima
P_{0_RACH}	Potência recebida desejada
Δ_{RACH}	*Power Ramping Step*
$\Delta_{Preamble}$	*Offset* do preambulo
m	Número de tentativas de transmissão do preâmbulo
R_s	Critério R para a célula de serviço
$Q_{meas,s}$	RSRQ da célula de serviço
$Qhyst_s$	Histerese da célula de serviço
R_n	Critério R para a célula vizinha
$Q_{meas,n}$	RSRQ da célula vizinha
$Qoffset_{s,n}$	*Offset* entre a célula de serviço e respectivas vizinhas
$T_{reselection}$	Tempo de reselecção de célula

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo pretende dar uma introdução ao estudo realizado, começando por um enquadramento do mesmo, seguindo para a apresentação dos objectivos. No final deste capítulo é ainda apresentada a estrutura que caracteriza o documento e os artigos publicados.

1.1 Enquadramento

As comunicações móveis atravessam tempos de mudança. Nos últimos anos, tem-se assistido a um aumento extraordinário do volume do tráfego de dados nas redes móveis. Estudos como o apresentado em [EgDu10] estimam que nos últimos dois anos, o tráfego de dados em todo o mundo tenha crescido aproximadamente 280%, e prevêem que este valor venha a duplicar anualmente nos próximos cinco anos. O aumento da diversidade de produtos e serviços, nomeadamente do tipo "*Mobile Broadband Services*", em parte impulsionado pela popularização dos *smarthphones*, é indicado como a causa mais provável para este crescimento tão acentuado dos serviços de dados, face aos serviços de voz. Toda esta procura dos mercados tem exigido um enorme empenho das operadoras na implementação de soluções, capazes de acompanhar este crescimento, ao mesmo tempo mantendo um elevado nível de competitividade. Toda esta evolução tem levado ao aumento inevitável da complexidade das redes móveis celulares. A chegada do LTE (Long Term Evolution), enquanto tecnologia de quarta geração para as redes móveis, vem adicionar mais uma tecnologia às já existentes, *Global System for Mobile Communications* (GSM) e *Universal Terrestrial Radio Access Network* (UMTS). Esta co-existência destas múltiplas tecnologias, em muitos casos provenientes de diferentes fabricantes, dificulta as tarefas de operação e manutenção por parte das operadoras. Numa era cada vez mais exigente em termos de qualidade de serviço, a automatização destas tarefas revela-se cada vez mais uma necessidade e um objectivo a ter em consideração. Neste campo, o LTE assume um papel importante na medida em que introduzirá pela primeira vez o conceito de rede auto-gerida. As *Self-Organizing/Self-Optimizing Networks* (SON) são um conjunto de normas e funções introduzidas na especificação do LTE, que permitirão às operadores automatizar as suas tarefas de operação e manutenção (O&M), proporcionando uma resposta mais eficaz às novas exigências de mercado e uma redução significativa de custos, marcando um ponto de viragem no paradigma da operação e manutenção de redes móveis.

1.2 Objectivos

O presente trabalho aborda um conjunto de sistemas que integram a arquitectura das SON, a qual permite a auto-gestão e optimização de redes celulares móveis de quarta geração, que assentam na norma LTE. Esta arquitectura, que poderá ser centralizada, distribuída, localizada ou híbrida, consiste num conjunto de funções que permitem auxiliar

as tarefas de planeamento, operação e manutenção de uma rede de acesso móvel, nomeadamente ao nível do eNodeB (*evolved* NodeB), através da sua parametrização, configuração e manutenção automáticas.

Assim, este trabalho tem como objectivo avaliar os principais benefícios das SON, no que diz respeito ao planeamento e optimização de redes de quarta-geração LTE, não só através do seu estudo, como também através da implementação de algoritmos que permitem observar e optimizar o funcionamento de algumas das suas principais funções.

Os algoritmos a implementar assentam sobre o "*System Level Simulator of LTE Networks*", um simulador LTE em código aberto, em desenvolvimento pelo Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering da Universidade Tecnológica de Vienna, Áustria (TU- WIEN[1]). As funções a implementar contemplam a atribuição e resolução de conflitos de PCI (Physical Cell Id), a criação automática de relações vizinhança, designada de ANR (Automatic Neighbour Relation) e a optimização automática de *handover* intra-frequência, intra-MME (Mobility Management Entity).

Atendendo às características do simulador adoptado e para possibilitar uma análise coerente dos algoritmos anteriores, serão igualmente implementadas funções que conferem ao primeiro a capacidade de simular o algoritmo de handover intra-frequência, tal como proposto pelo 3GPP para as redes LTE, [TS36300]. Em adição, para possibilitar a criação de cenários personalizados, para além dos cenários tipo que são implementados por este simulador, serão criadas funções que permitem a criação de cenários com um elevado grau de liberdade. Será também implementada uma interface gráfica que permite a criação e simulação de cenários e análise dos resultados obtidos em cada uma das funções SON anteriores.

Com vista à viabilização dos algoritmos implementados, pretende-se igualmente, através da definição de um conjunto de cenários baseados em cenários reais, com diferentes ambientes de propagação, avaliar entre outros parâmetros, a flexibilidade, fiabilidade e robustez destes. Os resultados obtidos são também confrontados, não só com dados estatísticos, como também com os resultados de simulações, usando a ferramenta de planeamento e optimização Atoll® da Forsk©[2].

[1] http://nt.tuwien.ac.at/ltesimulator

[2] http://www.forsk.com

1.3 Organização do relatório

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução –** Neste capítulo é feito um enquadramento do estudo realizado, a apresentação formal do relatório, descrição dos objectivos e organização do mesmo;
- **Capítulo 2: Estado de Arte –** Neste capítulo são introduzidos os conceitos e as tecnologias, bem como o seu estado da arte, consideradas essenciais para a compreensão do estudo realizado. Este capítulo começa com a abordagem de alguns conceitos básicos sobre as redes E-UTRAN (Envolved-UTRAN), onde se analisa a arquitectura e os conceitos que as diferenciam das restantes tecnologias usadas em redes móveis celulares. Posteriormente é apresentado, de uma forma sucinta, as *Self-Organizing/Self-Optimizing Networks*. Nesta segunda parte, identificam-se os requisitos, analisa-se a arquitectura e descreve-se o seu funcionamento através de casos de estudo propostos pelo 3GPP[3] (3rd Generation Partnership Project);
- **Capítulo 3: Planeamento e Optimização em Redes LTE –** Neste capítulo analisam-se as principais diferenças que são introduzidas no processo de planeamento e optimização nas rede E-UTRAN e a forma como as SON poderão auxiliar esse mesmo processo;
- **Capítulo 4: Simulação de Redes Auto-Geridas –** Neste capítulo é apresentado um simulador LTE e um conjunto de funções, que a partir do primeiro implementam três das mais importantes funcionalidades das SON no processo de planeamento e optimização em redes E-UTRAN;
- **Capítulo 5: Análise de Desempenho –** Neste capítulo são testadas as funcionalidades SON implementadas e descritas no capítulo 4. Através da apresentação de vários casos de estudo, é analisado o funcionamento e desempenho das funções implementadas;
- **Capítulo 6: Conclusões –** Neste capítulo são apresentadas as conclusões e algumas propostas de trabalho futuro, partindo do trabalho desenvolvido;

[3] http://www.3gpp.org

1.4 Artigos Publicados

As técnicas desenvolvidas e os resultados obtidos durante a realização deste trabalho permitiram a publicação dos seguintes artigos:

Carvalho, M., Vieira, P., "*An Enhanced Handover Oscillation Control Algorithm in LTE Self-Optimizing Networks*", 14th International Symposium on Wireless Personal and Mobile Communications (WPMC'11), Brest, France, IEEE, 2011.

Carvalho, M., Vieira, P., " *Um Algoritmo Avançado de Controlo de Oscilação de Handover em Redes LTE Auto-Geridas*", 5º Congresso Comité Português da URSI – Detecção e Medição de Sinais Rádio no Futuro das Radiocomunicações, Lisboa, Portugal, 2011.

Carvalho, M., Vieira, P., "*Simulating Long Term Evolution Self-Optimizing Based Networks*", 1st Conference on Electronics, Telecommunications and Computers, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (CETC'11), Lisbon, Portugal, 2011.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo proporciona uma introdução aos conceitos e tecnologias que serão abordados ao longo deste estudo. Neste capítulo começa-se com uma breve introdução ao LTE (Long Term Evolution), analisando os seus requisitos, arquitectura, interface rádio, e protocolos bem como outras características. Introduzidos os conceitos chave do LTE, parte-se para o estudo das redes SON (Self-Organizing/Self-Optimizing Networks), enquanto tecnologia para a implementação de redes auto geridas baseadas em LTE, analisando as suas características e funcionamento para diferentes cenários.

2.1 Long Term Evolution

O processo de especificação do LTE teve o seu início em Novembro de 2004, em Toronto, Canadá, quando um conjunto de empresas formado por operadoras, fabricantes e instituições de investigação apresentaram a sua visão do futuro das UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), através da apresentação de um conjunto de requisitos, onde constam aspectos como o aumento da eficiência espectral, a compatibilidade, ou redução dos custos de operação e manutenção (O&M) [3GPP04]. De facto, nos últimos anos, a redução de custos de operação e manutenção nas redes móveis celulares, assumiu particular importância para as operadoras.

A chegada da quarta geração das redes móveis, pela mão do 3GPP, com a tecnologia LTE, irá marcar uma forte mudança no paradigma das comunicações móveis, com a implementação de redes puramente *Packet Switched (PS)*, colocando os serviços de dados como principal área de negócio.

2.1.1 Requisitos

O aumento do desempenho em relação aos actuais sistemas móveis existentes é um dos principais objectivos das operadoras de redes móveis, para garantir a competitividade com a implementação do LTE e estimular o interesse do mercado para novos serviços. A norma LTE especifica débitos superiores, maior eficiência espectral, menor latência, flexibilização da largura de banda do canal e redução dos custos com a introdução de uma arquitectura plana, [TR25913].

As tecnologias chave do LTE são a modulação e codificação adaptativas (*Adaptative Modulation and Coding* (AMC)), *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) com a utilização de antenas adaptativas. Os requisitos identificados pelo 3GPP para o LTE em, [TR25913], incluem:

- Débito de Pico – 100 Mbps (5 bps/Hz) em *downlink* e 50 Mbps (2.5 bps/Hz) em *uplink* para uma atribuição do espectro de 20 MHz;
- Throughput – Capacidade em *downlink* 2-3 vezes maior do que a alcançada na Release 6 HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access);
- Eficiência Espectral – em *downlink* 3-4 vezes melhor do que a *Release* 6 HSDPA e em *uplink* 2-3 vezes melhor;

- Largura de banda – escalável para maior flexibilidade de espectro: 1,25; 1,6: 2,5; 5; 10; 15; 20 MHz;
- Interoperabilidade – com outros sistemas, onde os terminais deverão suportar as medidas e *handovers* entre os vários sistemas presentes;
- Custo – deverá ser alcançada uma redução de CAPEX (CAPital EXpenditure) e OPEX (OPerating EXpenses), incluindo *backhaul*. O custo de migração das actuais redes deverá ser reduzido. Deverá ser assegurada uma redução da complexidade, custo e consumo de energia dos terminais. Todas as interfaces especificadas estarão abertas a equipamentos *multi-vendor* de modo a promover a interoperabilidade;
- Atribuição do espectro – operação em pares (*Frequency Division Duplex* / Modo FDD) e espectro não partilhado (*Time Division Duplex* / Modo TDD) deverá ser possível;
- Co-existência – Deve ser assegurada a coexistência na mesma área geográfica e coabitação com GERAN (GSM EDGE Radio Access Network)/UTRAN. Além disso, a coexistência entre os operadores nas bandas adjacentes, bem como o convívio inter-fronteiras é uma exigência.

2.1.2 Arquitectura de Rede

O LTE foi desenhado apenas para suportar serviços comutados por pacotes, em contraste com os modelos baseados em comutação por circuitos nas gerações anteriores. Ao LTE associam-se dois termos, o primeiro está associado a uma evolução da tecnologia de acesso rádio UTRAN designado de E-UTRAN, o segundo está associado a uma evolução dos aspectos não rádio, mais concretamente à arquitectura de *core*, e designa-se de *System Architecture Evolution* (SAE). Juntos, estes dois conceitos dão origem ao *Envolved Packet System* (*EPS*).

A E-UTRAN é responsável pelas funções de gestão de recursos rádio, compressão de dados, segurança e conectividade com as entidades core, sendo estas, o MME e S-GW (Serving Gateway). Na E-UTRAN a maioria das funções de gestão rádio são atribuídas ao eNB (evolved NodeB), o que permite uma melhor interacção entre protocolos de diferentes camadas da rede de acesso, reduzindo assim a latência e aumentando a eficiência da rede, [ShSo11]. Esta solução permite eliminar a necessidade

de um equipamento central para gestão rádio, como é o caso do RNC (Radio Network Controller), característico do UMTS. Contudo, a descentralização de esta e outras funcionalidades obriga a que os eNBs troquem informação entre si, nomeadamente em situações de *handover* como se passava com a interface IuR no UMTS. Assim, na E-UTRAN, os eNB estão interligados entre si por intermédio de uma interface designada de X2 e interligados com a rede EPC (Evolved Packet Core) através de dois tipos de interface, S1-MME para a interligação com a entidade MME e S1-U para interligação ao S-GW, [3GPP06], Figura 2.1.

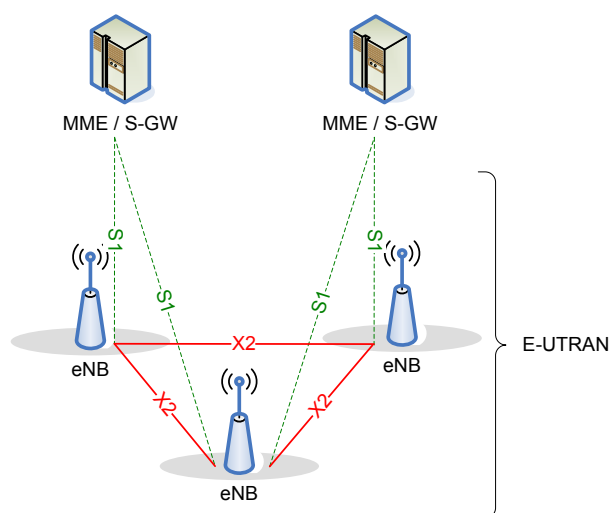



Figura 2.1 – Arquitectura genérica do E-UTRAN, [TS36300].

O eNB actua como *bridge* entre o *User Equipment* (UE) e o EPC, transferindo a informação proveniente da conexão rádio existente com o UE para uma dada conexão IP (Internet Protocol) com o EPC. O eNB é responsável pela gestão de recursos rádio através do RRM (Radio Resource Management) e desempenha um papel importante na gestão de recursos rádio em conjunto com o MME. Com base nas medidas rádio reportadas pelo UE e nas medidas efectuadas pelo eNB, o eNB toma decisões quanto ao *handover* de um UE entre células.

O SAE é uma evolução do core GPRS (General Packet Radio Service) com algumas diferenças, das quais se destacam o facto de ser totalmente baseada em IP (*All-IP*) e suportar a mobilidade entre redes heterogéneas. O principal elemento da SAE é o já referido EPC, também designado de SAE Core. O EPC é uma designação lógica ao grupo constituído pelos seguintes elementos:

- *Mobility Management Entity* (MME) – é o nó de controlo que processa a informação entre o UE e a CN (Core Network), através de um conjunto de protocolos denominados de NAS (Non-Access Stratum);
- *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF) – responsável pelas políticas de decisão, bem como pelo controle das funcionalidade de *charging* através de uma *Policy Control Enforcement Function* (PCEF);
- *Home Location Register* (HLR) – contém os dados de subscrição dos utilizadores bem como as *Packet Data Network* (PDN) a que cada um deles pode ligar;
- PDN *Gateway* (P-GW) – é o ponto de interligação da rede com E-UTRAN com outras PDN exteriores;
- *Serving Gateway* (S-GW) – é o ponto através do qual os pacotes de um dado UE são encaminhados quando este se move dentro da E-UTRAN de um eNB para outro;
- HSS (*Home Subscription Server*) – contém informação necessária à autenticação do UE.

A Figura 2.2 seguinte ilustra o relacionamento lógico entre as entidades anteriormente referidas.

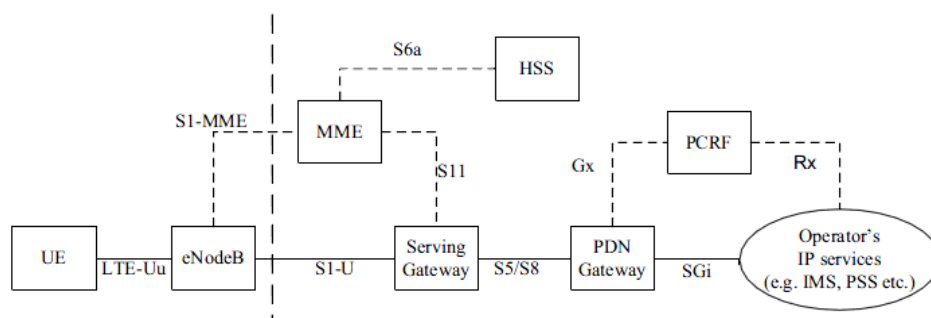



Figura 2.2 – Arquitectura EPS, [SeTo09].

No que toca às interfaces presentes na arquitectura da Figura 2.1, a interface S1 interliga o eNB ao EPC e é dividida em duas partes: plano de utilizador e plano de controlo. No plano de utilizador, S1-U (S1 User Plane Interface), esta interface transporta os dados do eNB para o Serving GW. A estrutura do protocolo usado nesta interface é semelhante à usada pelo UMTS e baseia-se na pilha protocolar GTP (Generic Tunneling Protocol) / UDP (User Datagram Protocol) / IP. No plano de controlo a interface S1 (S1

Control Plane Interface) baseia-se no protocolo SCTP (Stream Control Transmission Protocol) sobre IP (SCTP/IP). O SCTP é usado por ser um protocolo com garantia de serviço muito similar ao TCP (Transmission Control Protocol).

A interface X2 é, como já foi referido, usada para interligar eNB(s) e usa os mesmos protocolos que a interface S1, quer para o plano de utilizador quer para o plano de controlo. A interface X2 pode ser estabelecida quando existe necessidade de dois eNB trocarem informação entre si. O estabelecimento da interface X2 poderá ser despoletado por dois eventos: carga de tráfego ou informação de interferência e informação de *handover*. A inicialização do procedimento para estabelecer uma interface X2 começa com a identificação do eNB destino da ligação. Esta identificação é levada a cabo pela *Automatic Neighbour Relation Function* (ANRF). O funcionamento desta função será abordado mais tarde aquando do estudo das SON.

2.1.3 Interface Rádio

Num sistema tradicional, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora cujo espectro ocupa a largura de banda disponível no canal. Nestes sistemas, para separar os canais são inseridas bandas de guarda. A técnica de transmissão OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) baseia-se numa modulação multi-portadora, onde os dados a transmitir são enviados de um modo paralelo em diversas sub-portadoras espaçadas entre si, e cuja frequência atribuída a cada uma permite que estas sejam ortogonais entre si. Esta característica apresenta inúmeras vantagens, de entre as quais, uma maior eficiência espectral, maior robustez à interferência Inter-Simbólica (ISI), imunidade ao efeito multi-percurso, entre outras. Apesar das vantagens, o facto de termos sub-portadoras ortogonais torna este sistema mais sensível a desvios de frequência. Para além disso, os sinais OFDM possuem uma elevada relação de potência de pico/potência média PAPR (Peak to Average Power Ratio). A Figura 2.3 ilustra o espectro de um símbolo OFDM.

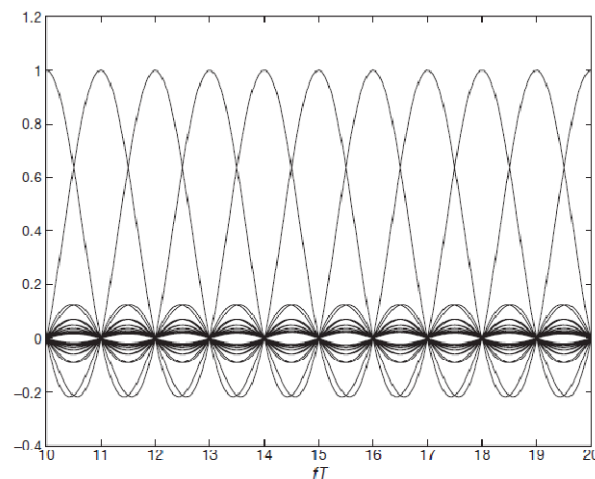



Figura 2.3 – Símbolo OFDM com portadoras ortogonais entre si, [LuSc05].

No LTE o esquema de acesso múltiplo em *downlink* é baseado em OFDMA (Orthogonal Frequency Division Muliple Access) e em *uplink* é baseado em SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). O OFDMA é uma extensão do OFDM para comunicações em sistemas multi-utilizador. Neste esquema, as sub-portadoras resultantes de um símbolo OFDM podem ser distribuídas por vários utilizadores ao mesmo tempo, permitindo que estes sejam escalonados para receber dados simultaneamente, ver Figura 2.4.

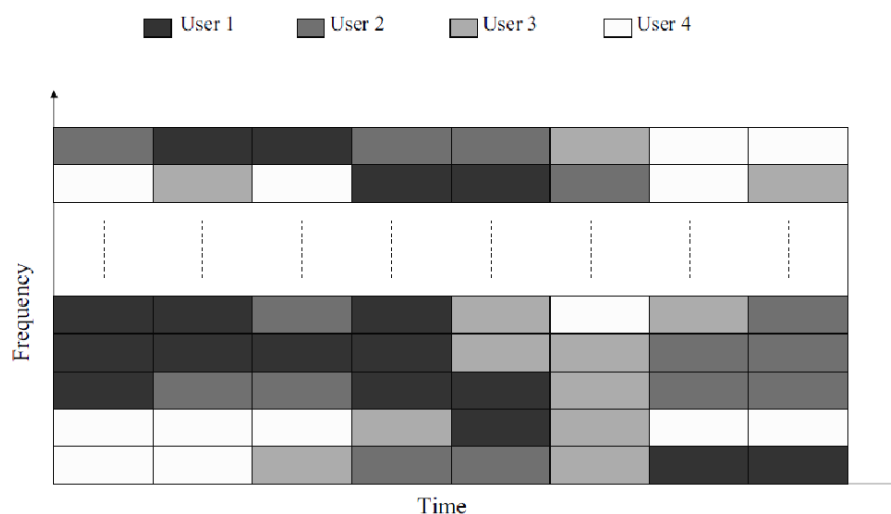



Figura 2.4 – Exemplo de atribuição de recursos em OFDMA/TDMA [HoTo09].

A escolha pelo OFDM em detrimento de outros esquemas de modulação existentes, prende-se essencialmente com a sua grande imunidade à interferência inter-simbólica. Contudo, devido ao efeito de Doppler, o espaçamento entre sub-portadoras fixou-se nos 15 kHz. A escolha deste tipo de modulação apenas para o *downlink* deveu-se a factores

como o elevado PAPR que caracteriza os símbolos OFDM, e que só pode ser minimizado através de uma amplificação bastante linear, pela necessidade de esquemas de codificação adaptativa e pela baixa tolerância deste esquema a desvios de frequência. Devido às características do UE, alcançar estes objectivos seria muito difícil, principalmente no que toca à redução do PAPR que exigiria uma amplificação linear por parte do UE o que iria traduzir-se num consumo de energia elevado. Por estes motivos, em *uplink* foi adoptada a modulação SC-FDMA (Single Carrier FDMA), uma derivação do OFDM. O SC-FDMA ou DFT-Spread-OFDM (Discrete Fourrier Transform Spread FDMA) é um esquema de transmissão que através da aplicação da DFT a um conjunto de *N* símbolos em *uplink*, consegue mapear cada transmissão em diferentes portadoras com diferentes larguras de banda, ver Figura 2.5.

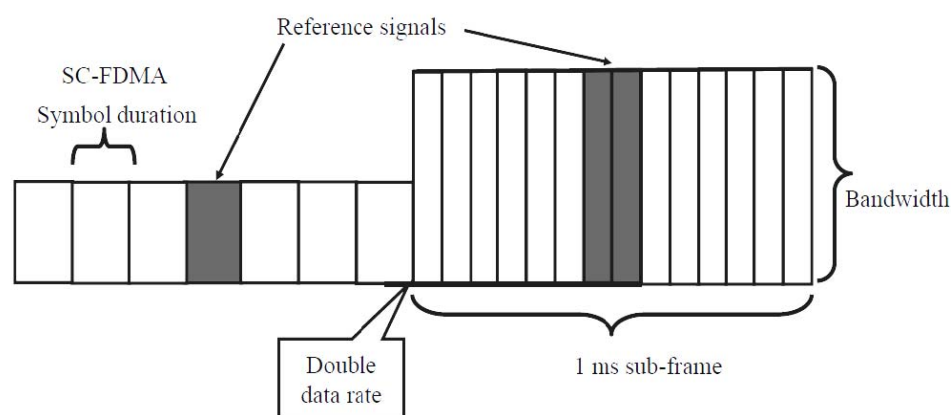



Figura 2.5 – Ajuste de largura de banda num sistema SC-FDMA, [HoTo09].

2.1.4 Protocolos de Rádio

À semelhança de tecnologias anteriores, na E-UTRAN, cada interface é dividida em plano de utilizador e plano de controlo. O plano de utilizador transporta os dados do utilizador, tais como voz e dados, bem como sinalização ao nível das aplicações usadas pelo UE. O plano de controlo suporta todas as mensagens e procedimentos estritamente relacionados com as funcionalidades suportadas pela interface, como por exemplo mensagens de controlo para o procedimento de *handover* do UE. À semelhança do UMTS, cada plano define a sua pilha protocolar.

A adição de funcionalidades que conferem a capacidade de uma rede E-UTRAN se auto-gerir, desde cedo foi tida em conta no desenvolvimento dos protocolos a usar nas interfaces X2 e S1. A pilha protocolar usada na arquitectura E-UTRAN é dividida em dois

tipos: *User Plane* e *Control Plane*. A Figura 2.6 mostra a pilha protocolar no plano de utilizador.

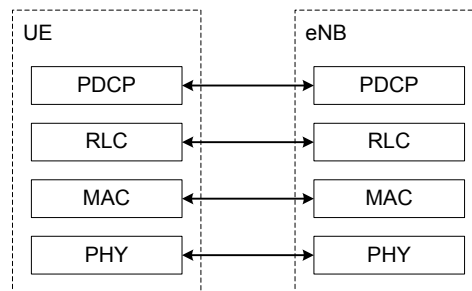



Figura 2.6 – Pilha Protocolar para o plano de utilizador, [TS36300].

Na E-UTRAN, diferentes protocolos de *tunneling* são usados em diferentes interfaces. Um protocolo de tunneling usado no 3GPP é designado de GPRS *Tunneling Protocol* (GTP) e é usado na interface core da rede, S1 e S5/S8. A Figura 2.6 ilustra os diferentes protocolos que compõem a camada no plano do utilizador do LTE. Esta camada é composta pelo:

- *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) – é responsável pelo processamento das mensagens de gestão de recursos rádio (*Radio Resource Control* (RRC)) no plano de controlo e dos pacotes IP no plano do utilizador. Cabe a este protocolo as funções de compressão, segurança (integridade e confidencialidade), ordenação em pacotes IP e retransmissão em situações de *handover*;
- *Radio Link Control* (RLC) – é responsável pela segmentação e reconstrução de pacotes IP para transmissão pelo link rádio, retransmissão em caso de erro e reorganização para o uso de *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ);
- *Medium Acces Control* (MAC) – é responsável pela multiplexagem dos dados da interface rádio.

Para o plano de controlo temos a sinalização entre UE, eNB e MME. Todas as decisões de mobilidade são levadas a cabo pelo eNB, mas o MME também actua quando esta ocorre entre eNB diferentes através da camada NAS, que permite sinalização entre o UE e o MME, Figura 2.7.

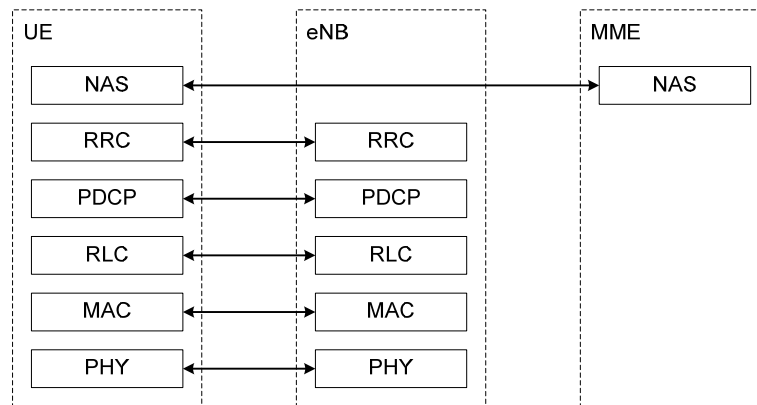



Figura 2.7 – Pilha Protocolar para o plano de controlo, [TS36300].

2.1.4.1 Canais Lógicos

Através de canais lógicos, a interface MAC troca informação com a camada RLC. Os canais lógicos podem ser divididos em canais de controlo, para o transporte de sinalização, e canais de tráfego para o transporte de dados do utilizador. O conjunto de canais de controlo é:

- *Broadcast Control Channel* (BCCH) – Usado para difusão da informação de célula;
- *Paging Control Channel* (PCCH) – Usado para notificar o UE de uma chamada ou para comunicar a alteração da informação de célula;
- *Common Control Channel* (CCCH) – Usado para comunicar informação de controlo em *uplink* ou *downlink* quando não existe uma ligação RRC entre o UE e a rede;
- *Multicast Control Channel* (MCCH) – Usado para transmitir informação em multicast;
- *Dedicated Control Channel* (DCCH) – Usado para transmitir informação de controlo em modo dedicado para um determinado UE, quando este possui uma ligação RLC com o eNB.

Quanto aos canais de tráfego temos:

- *Dedicated Traffic CHannel* (DTCH) – Usado para transportar os dados do utilizador tanto em *uplink* como em *downlink*, quando o UE se encontra no modo dedicado;
- *Multicast Traffic Channel* (MTCH) – Usado para transporte dos dados do utilizador para serviços multimédia, MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) em *downlink*.

2.1.4.2 Canais de Transporte

Através de canais de transporte os canais físicos trocam informação com a camada MAC.

O LTE contém apenas canais de transporte comuns não possuindo canais dedicados (e.g. DCH (Dedicated Channel) no WCDMA (Wide-Band Code-Division Multiple Access)). Os canais de transporte proporcionam a interface entre a camada MAC e a camada física. Dependendo das condições de transmissão na interface rádio, os dados são multiplexados em canais de transporte. Os canais de transporte são os seguintes:

- *Broadcast Channel* (BCH) – Usado para difusão dos parâmetros da rede que permitem aos móveis aceder a esta;
- *Downlink Shared Channel* (DL-SCH) – Canal que transporta os dados do utilizador para uma ligação do tipo ponto-a-ponto, ou seja, informação que é destinada apenas a um UE no estado RRC_CONNECTED. Adicionalmente a informação de sistema que não é transportada pelo BCH é transportada pelo DL-SCH;
- *Paging Channel* (PCH) – Canal que transporta a informação de *paging* para o UE, para que este passe do estado RRC_IDLE para RRC_CONNECTED na sequência de um pedido da rede. Adicionalmente é usado para informar o UE de actualizações na informação de sistema;
- *Multicast Channel* (MCH) – Canal usado para transportar dados dos utilizadores ou informação de controlo em multicast;
- *Uplink Shared Channel* (UL-SCH) – Canal usado para transportar dados e informação de controlo dos móveis em *uplink*;
- *Random Access Channel* (RACH) – Usado para acesso aleatório dos móveis à rede, quando estes não se encontram sincronizados com a rede.

Em *uplink*, o UL-SCH é transportado pelo *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) e o RACH é transportado pelo *Physical Random Access Channel* (PRACH). Adicionalmente é utilizado um canal para transporte de informação de controlo da camada física. Em *downlink* o PCH em conjunto com o DL-SCH é mapeado no *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH), o BCH é mapeado no *Physical Broadcast Channel* (PBCH) e o MCH mapeado no *Physical Multicast Channel* (PMCH). A Figura 2.8 e Figura 2.9 ilustram o mapeamento existente entre canais lógicos e canais de transporte em *downlink* e *uplink* respectivamente, [TS36321].

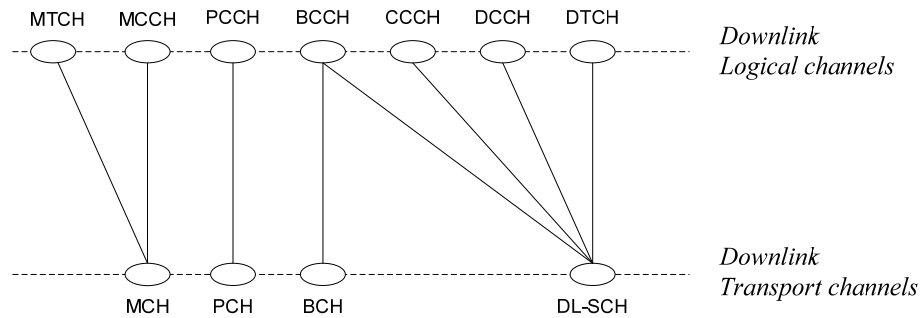



Figura 2.8 – Mapeamento dos canais lógicos para os canais de transporte em downlink, [TS36321].

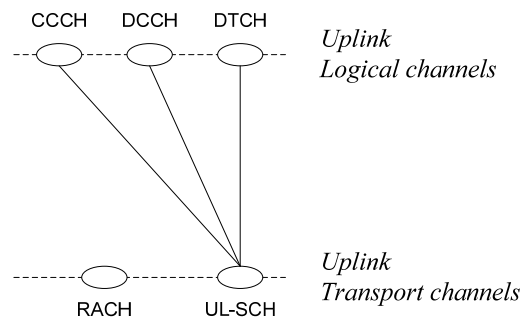



Figura 2.9 – Mapeamento dos canais lógicos para os canais de transporte em uplink, [TS36321].

2.1.4.3 Canais Físicos

A camada física mapeia canais físicos em canais de transporte. Nesta camada encontramos os procedimentos de procura de célula, controlo de potência e adaptação à ligação. Cada canal físico corresponde a um conjunto de sub-portadoras OFDM, que transportam a informação das camadas superiores. Os canais físicos usados no LTE são os que se seguem:

- *Physical Broadcast Channel* (PBCH) – usado para transportar informação de sistema (frequência, canal de controlo, sincronização de trama, etc.);
- *Physical Control Format Indicator Channel* (PCFICH) – informa o UE do número de símbolos OFDM que são usados no canal PDCCH;
- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) – Transporta informação relativa a: formato dos canais de transporte DL-SCH e PCH; formato H-ARQ no DL-SCH; formato, atribuição de recursos e informação de H-ARQ relativa ao UL-SCH;

- *Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel* (PHICH) – Transporta o HARQ de ACKNOWLEDGE e NOT ACKNOWLEDGE (ACK/NAK) associado com as transmissões de dados em *uplink*;
- *Physical Downlink/Uplink Shared Channel* (PDSCH/PUSCH) – transporta os canais de sincronização no SCH e UL-SCH, bem como informação de PCH;
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) – transporta o HARQ para as transmissões em *downlink*, agendamento e indicador de qualidade de canal (*Channel Quality Indicator* (CQI));
- *Physical Random Access Channel* (PRACH) – Transporta os preâmbulos de acesso que são enviados pelo UE.

2.1.5 Codificação, Modulação e Multiplexagem

Para melhorar a transmissão com desvanecimento intenso, o LTE recorre ao *Convolutional Turbo Coding* (CTC) para a codificação de canal. Para combater as rajadas de erros em ambientes multi-percurso, a informação de canal codificada passa por um processo de *interleaving* de modo a espalhar os erros no tempo. Através do *interleaving* aumentam-se as hipóteses de correcção de erros nos símbolos transmitidos.

Quanto à modulação, esta é dependente das características do canal. Com base em medidas efectuadas, o UE envia o *Channel Quality Indicator* (CQI) ao eNB. É com base no CQI que o eNB escolhe o esquema de modulação que mais se adapta às condições do canal. Os esquemas de modulação possíveis vão desde o QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) com dois bit por cada símbolo e 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) com seis bits por cada símbolo. No LTE, a codificação e modulação adaptativa (AMC) é implementada em *uplink* e *downlink* de acordo com as condições do canal. Desta forma o esquema de modulação e codificação é alterado automaticamente consoante as condições do canal.

Finalmente, os esquemas de multiplexagem baseados em multi-portadora revelam-se eficazes na mitigação da interferência de banda estreita e efeitos provocados pelo multi-percurso. Neste campo, o LTE recorre ao OFDMA para transmissão *downlink* e SC-FDMA para o *uplink*, tal como já foi referido anteriormente.

2.1.6 Técnicas de Antenas Múltiplas

Uma das principais tecnologias introduzidas com as primeiras especificações do LTE nomeadamente da E-UTRAN, foi o modo de operação MIMO, que introduziu os conceitos de multiplexagem espacial, *beamforming* e diversidade de transmissão. Neste esquema de transmissão, os sinais das antenas de transmissão (TX) são combinados com os sinais das antenas de recepção (RX), de tal modo que a qualidade da ligação, quantificada pelo BER (Bit Error Rate) e débito da ligação (bps) atribuídos a cada utilizador, são aumentados.

No transmissor, vários fluxos de símbolos são gerados, com um determinado grau de redundância. Cada um destes fluxos é mapeado numa antena do conjunto de múltiplas antenas de transmissão. No receptor, os múltiplos sinais são capturados por uma ou mais antenas e são desmodulados e desmapeados a fim de recuperar a mensagem original. O MIMO pode operar em três modos: Multiplexagem Espacial, Diversidade e Pré-Codificação.

O princípio básico por detrás da multiplexagem espacial está no envio simultâneo de diferentes fluxos de dados do utilizador, através de múltiplas ligações em paralelo, de modo a aumentar a capacidade do sistema. Neste mecanismo, um canal MIMO composto por *M* antenas de transmissão e *N* antenas de recepção, forma *MxN* ligações possíveis, eventualmente estatisticamente descorrelacionadas, entre o emissor e o receptor, ver Figura 2.10. Nesta situação é possível fornecer uma protecção *MxN* vezes maior ao efeito de desvanecimento multi-percurso em comparação a uma situação de mono antena *M*=*N*=1 (SISO, *Single Input Single Output*).

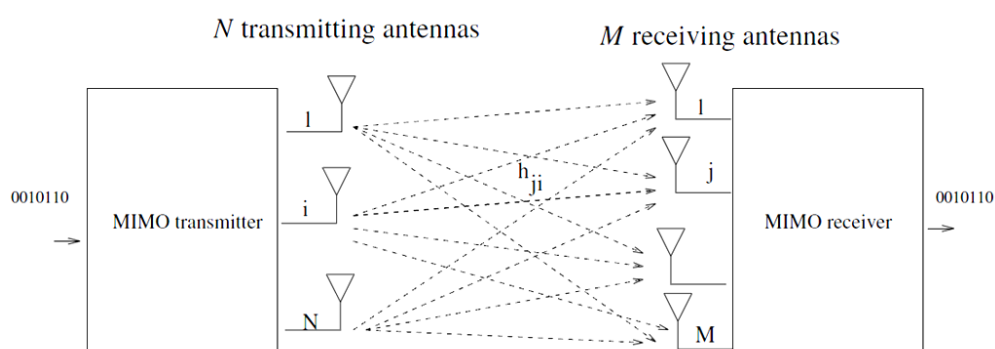



Figura 2.10 – Modelo de Transmissão MIMO com N antenas de TX e M antenas de RX, [SeTo09].

Os múltiplos percursos que um sinal pode tomar quando viaja do UE para o eNB e vice-versa, dão origem a várias réplicas que chegam às antenas em diferentes instantes. Devido aos diferentes percursos, cada réplica sofre um desvio de fase em relação ao sinal original o que é indesejado pelo facto de poder anular o sinal resultante no receptor. O Modo Diversidade é uma técnica que permite usar múltiplas antenas, de modo a aumentar a qualidade de ligação entre um emissor e um receptor, podendo ser implementada no emissor ou receptor ou em ambos. Este mecanismo de diversidade consiste em usar duas ou mais antenas colocadas a uma determinada distância entre si, para que possam receber sinais provenientes de diferentes caminhos e que, através do uso de técnicas combinação de sinal ou comutação entre antenas, possam aumentar o ganho do sinal recebido. As principais técnicas conhecidas, são o MRC (Maximum Ratio Combining), uma técnica que combina os sinais provenientes de diferentes antenas através de algoritmos de processamento para maximizar o nível de SNR e o SD (Switch Diversity), onde o receptor comuta de antena sempre que verifica que a potência do sinal recebido ou que o nível de ruído aumenta numa antena e desce noutra. A diversidade na transmissão aumenta a área de cobertura de uma célula, e permite aumentar os débitos na ligação, através da escolha do caminho que maximiza o *Signal-to-Noise Ratio* (SNR).

Finalmente, a técnica de *beamforming* é baseada no conhecimento de canal pelo transmissor, para obter um ganho de capacidade. *Beamforming* MIMO é uma técnica que usa múltiplas antenas de transmissão para criar um feixe na direcção do receptor alvo. Com o conhecimento do canal de transmissão, o transmissor gera um vector de pré-codificação, o qual permite a este colocar menos ganho na direcção com mais interferência e mais ganho na direcção com menos interferência.

2.2 Self Organizing Network

Com o aumento da complexidade das redes celulares, tornou-se evidente a necessidade de criação de funções, capazes de minimizar aquela que é uma das tarefas mais intensas na operação de uma rede móvel celular, que é a sua optimização.

Os principais benefícios na implementação de técnicas de auto-gestão em redes Wireless podem-se traduzir em ganhos de eficiência e na redução dos custos operacionais e capitais (OPEX/CAPEX) das operadoras. Do ponto vista operacional, pretende-se reduzir a intervenção humana em processos como integração de novas estações, automatizando ao máximo as tarefas envolvidas (e.g. instalação, configuração e optimização), reduzindo as hipóteses de erro humano. Do ponto de vista capital, a automatização deste tipo de tarefas, minimiza o número de recursos humanos necessários, e também os custos.

Antecipando esta tendência, o fórum NGMN[4] (*Next Generation Mobile Networks*) estabelece em 2006, um conjunto de requisitos para as redes auto-geridas, desde então designadas de *Self-Organizing/Self-Optimizing Networks* (SON), [LeFr08]. O estabelecimento deste conjunto de requisitos viria a contribuir mais tarde para a adopção das SON pelo 3GPP no seu processo de especificação da E-UTRAN, [NNJT10].

As SON têm vindo a ser discutidas desde o início da especificação do LTE (E-UTRAN) pelo 3GPP, mais concretamente desde a sua primeira publicação (Realease-8). Desde então tem sido alvo de uma série de melhorias através das publicações que se seguiram (Release 9 e 10). Para além dos desenvolvimentos levados a cabo pela NGMN e pelo 3GPP, existem outros projectos a nível europeu, que têm contribuído significativamente na especificação das SON, dos quais de destaca o projecto SOCRATES[5] (Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelEss networkS) que visa o desenvolvimento de mecanismos para auto-gestão de redes sem fios, através da integração do planeamento, configuração e optimização num único processo que minimiza a intervenção humana, [NNJT10].

[4] http://www.ngmn.org

[5] http://www.fp7-socrates.org

2.2.1 Requisitos das SON

A implementação de funções para automatização de procedimentos operacionais em redes móveis, com múltiplas tecnologias e em muitos dos casos provenientes de múltiplos fornecedores, coloca muitos desafios e implica um conjunto de requisitos. Segundo [NNJT10], os requisitos impostos no desenvolvimento das SON poderão ser divididos em requisitos técnicos e de negócio. Ao nível dos requisitos técnicos, encontram-se aspectos como: desempenho, estabilidade, robustez, escabilidade e interacção multi-fornecedor, e quanto aos requisitos de negócio, encontramos os custos associados à sua implementação.

Segundo [SOCR08], os desafios impostos ao desenvolvimento das SON poderão ser os seguintes:

- Medição e análise de indicadores – Identificar qual a informação que deverá ser recolhida, tendo em conta o rácio entre quantidade de informação necessária e quantidade de sinalização gerada;
- Inferência do estado da rede – Analisar o correcto estado da rede e processar adequadamente os dados recolhidos;
- Tolerância a atrasos – Tolerância a atrasos na análise de *feedback* de decisões tomadas pelo algoritmo. Ter em consideração que o *feedback* da rede perante determinadas decisões poderá não ser imediato;
- Eficiências dos métodos – Os métodos implementados deverão ter um tempo de resposta, o mais linear quanto possível evitando oscilações e degradação da qualidade de serviço (QoS);
- Fiabilidade dos métodos – Os métodos implementados deverão ser fiáveis e evitar situações que prejudiquem o desempenho da rede;
- Compatibilidade – Devido à multiplicidade de fornecedores e tecnologias de acesso rádio (*Radio Access Tecnology* (RAT)), as funções implementadas deverão ser escaláveis e possuir protocolos independentes de fornecedor que permitam a comunicação entre elas.

2.2.2 Arquitectura

Em termos de arquitectura, as SON podem ser divididas em quatro tipos. Dependendo da localização dos algoritmos de optimização esta poderá ser centralizada, distribuída,

localizada e híbrida. Numa arquitectura do tipo centralizada, todas as decisões são tomadas ao nível do *Element Mangement System* (EMS) e *Network Management System* (NMS). Esta arquitectura visa implementar todo um conjunto de funções que implicam a interacção entre vários elementos da rede, como é o caso do ANR e PCI. A principal vantagem no uso deste tipo de arquitectura é a facilidade de implementação de novas funções na rede, uma vez que todas as funções são implementadas nos sistemas OAM (Operation Administration and Maintenance). Contudo, por se tratar de uma solução centralizada, poderá revelar-se pouco escalável com o aumento do número de elementos na rede. O aumento do volume de decisões na EMS/NMS poderá introduzir atrasos em situações de convergência na rede, o que irá prejudicar o desempenho da mesma. Outra desvantagem prende-se com o facto de, numa eventual falha dos sistemas EMS/NMS, toda a gestão automatizada da rede poderá ficar comprometida. Finalmente, a dificuldade de interacção entre os fornecedores dos sistemas OAM torna esta solução ainda menos desejável.

Numa arquitectura do tipo distribuída, todas as decisões são tomadas ao nível dos elementos de rede (e.g. eNB). Neste caso, os algoritmos de optimização são executados ao nível do eNB. Esta solução diminui drasticamente a complexidade no EMS/NMS, pois todo o processo de convergência passa a ocorrer localmente, bastando a estes manter um registo das alterações que vão sendo feitas na rede. Um exemplo prático do funcionamento desta arquitectura poderá ser o caso em que uma célula de um dado eNB precisa de trocar informações com uma outra célula de um outro eNB. Neste caso ambos os eNB precisam de trocar informações entre eles através da interface X2. Dependendo do número de optimizações, este tipo de situações poderá provocar um aumento do tráfego nas interfaces X2, o que deverá ser tido em conta neste tipo de arquitectura. Numa arquitectura do tipo localizada, as decisões são tomadas ao nível da célula não afectando necessariamente as suas vizinhas. Numa arquitectura do tipo Híbrida, temos decisões que são tomadas, quer ao nível local quer ao nível central da rede. Este tipo de solução é útil para optimizações com diferentes requisitos. Para além disso, esta arquitectura permite a optimização entre equipamentos de diferentes fabricantes através de interfaces X2 e interfaces Itf-N (North Bound Interface), [TS32521].

2.2.3 Funções das SON

Segundo [TS36300], a configuração do elemento de rede poderá ser dividida em duas fases: pré-operacional e operacional. A Figura 2.11 ilustra uma *framework* para as funções de auto-configuração/auto-optimização.

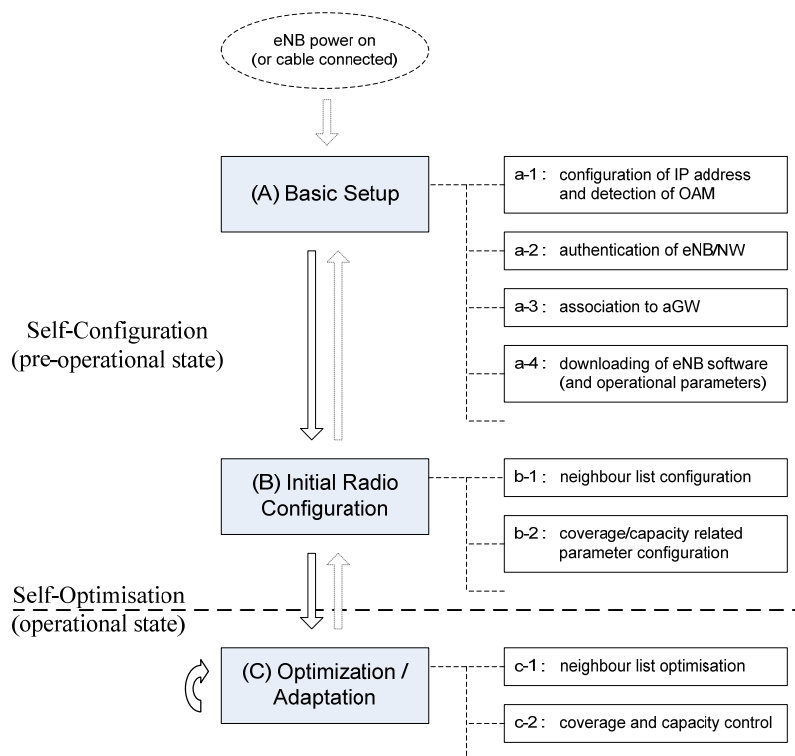



Figura 2.11 – Procedimentos de Self-Configuration/Self-Optimization, [TS36300].

A Figura 2.11 pode ser ainda complementada com a inclusão das funções de auto-diagnostico/auto-reparo e aplicação de esquemas de resolução tal como é sugerido por, [Lehe08]. Nas secções que se seguem descreve-se, de um modo geral, as principais funções de configuração e optimização existentes nas SON. No Anexo A são descritas as funções mais avançadas das SON.

2.2.3.1 Auto-Configuração

Segundo [TS36300], o procedimento inicial de *Self-Configuration* é dividido em duas fases: *Basic Setup* e *Initial Radio Configuration*. Na primeira fase, após a instalação física do equipamento, uma vez ligado, o eNB começa por fazer um auto-diagnóstico seguido de um processo de auto-descoberta, onde irá detectar o tipo de transporte, equipamento RF (Radio Frequency) instalado, etc. De seguida, o eNB configura o seu *link* de transporte e estabelece uma ligação com um servidor de DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) / DNS (Domain Name System) onde irá obter o seu IP e informação relativa ao

S-GW, MME e servidor do qual irá descarregar a sua configuração. Uma vez estabelecida a ligação OAM, o eNB descarrega a versão de *software* mais indicada assim como a configuração mínima que lhe permite saber: restantes elementos aos quais se deve ligar, bandas de frequências, etc. A informação disponibilizada ao eNB deverá permitir igualmente que este estabeleça uma ligação SCTP com pelo menos um MME. Uma vez estabelecida a ligação com o MME, o eNB deverá recolher a informação necessária para estabelecer uma interface S1-MME. Para permitir as funções de mobilidade e ICIC (Inter-Cell Interference Control), a interface X2 deverá ser igualmente estabelecida inicialmente com os eNB indicados por O&M. Uma vez integrado, o eNB poderá estabelecer outras ligações X2 com outros eNB com base nas funções de ANR, de modo a optimizar *handover*.

Após a configuração do eNB, dá-se início à segunda fase, com a configuração das relações-vizinhança através do mecanismo de ANR, o qual será descrito nos subcapítulos que se seguem.

2.2.3.2 ANR (Automatic Neighbour Relation)

Uma das principais causas para o aumento do CDR (Call Drop Rate) numa rede móvel, está na má definição de relações vizinhança ou mesmo na ausência destas. Tipicamente nos sistemas 2G e 3G, a especificação das relações vizinhança é levada a cabo através de ferramentas de planeamento, que através de mapas estimam a propagação e daí as relações vizinhança necessárias para garantir o *handover*. No entanto, imperfeições nos mapas usados ou alterações ao meio físico, dão origem a discrepâncias entre as relações previstas e as realmente necessárias, o que obriga à realização de *drive tests* para identificar exaustivamente as regiões de *handover*, [AmFr08]. Para além das discrepâncias entre as vizinhas planeadas e regiões de *handover*, o próprio processo de criação/actualização de relações vizinhança, representa uma percentagem considerável das tarefas de operação e manutenção de uma rede móvel, nomeadamente, em ambientes multi-fornecedor.

A *Automatic Neighbour Relation* é uma função implementada ao nível do eNB que permite, com o auxílio do relatório de medidas enviado pelo UE, adicionar ou remover relações vizinhança ao eNB sempre que necessário. Relativamente ao ANR, vários algoritmos têm sido propostos tais como o apresentado em [KiHo10]. Segundo [TS36300], para cada célula do eNB, deverá ser mantida uma *Neighbour Relation Table* (NRT). A cada entrada na NRT corresponde uma *Neighbour Relation* (NR) que deverá ter a

informação do *Target Cell Identifier* (TCI) que identifica a célula destino. Na E-UTRAN, o TCI corresponde ao E-UTRAN Cell Global Identifier (ECGI) e PCI da célula destino. Cada NR na NRT deverá ter três atributos: NoRemove, NoHO e NoX2. Estes atributos determinam qual o tratamento que deverá ser dado a cada NR aquando da análise de relações vizinhança pela função de ANR. Assim, estes atributos têm a seguinte definição:

- NoRemove – atributo que indica que a NR em análise não deverá ser removida da NRT;
- NoHo – atributo que indica que a NR em análise não deverá ser usada pelo eNB para fins de *handover*;
- NoX2 – atributo que indica que a NR não deverá usar a interface X2 para iniciar os procedimentos de *handover* com o eNB que detém a célula de destino.

A Figura 2.12, mostra uma proposta de funcionamento da função ANR pelo 3GPP, [TS36300]. Nesta podemos observar a interacção entre a função ANR e o RRC, bem como a ligação O&M com outros eNBs da rede.

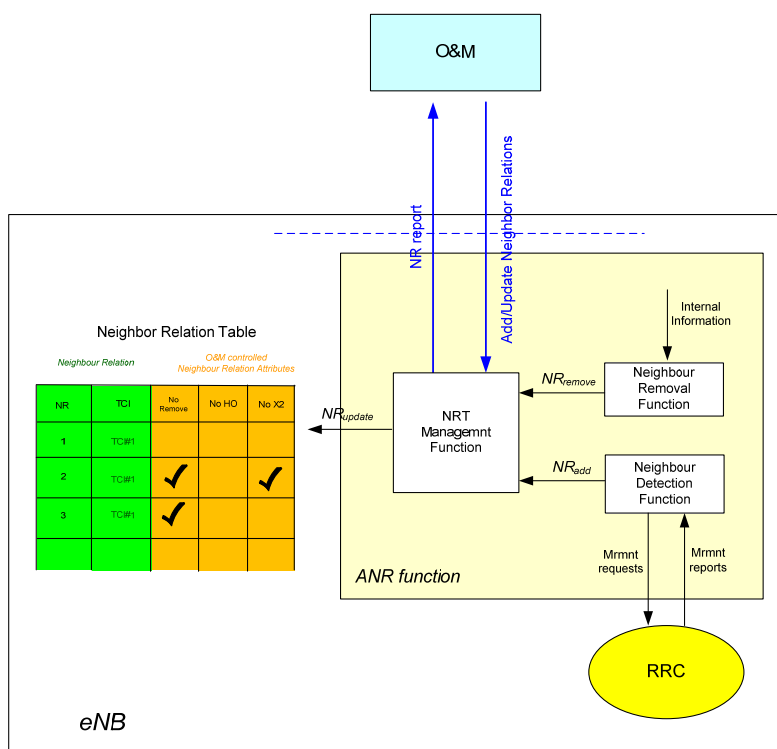



Figura 2.12 – Funcionamento da função ANR proposto em [FeSe08].

De seguida, são analisados alguns cenários tipo em que é usada a função ANR e que tem como referência a ilustração anterior.

2.2.3.2.1 Intra-LTE/Intra-Frequency ANR

Segundo [TS36300], o funcionamento do ANR assenta no facto das células difundirem o seu ECGI. Partindo do procedimento ilustrado na Figura 2.13. descreve-se de seguida o funcionamento da função ANR para o caso em que temos um *handover* intra-LTE/intra-frequência.

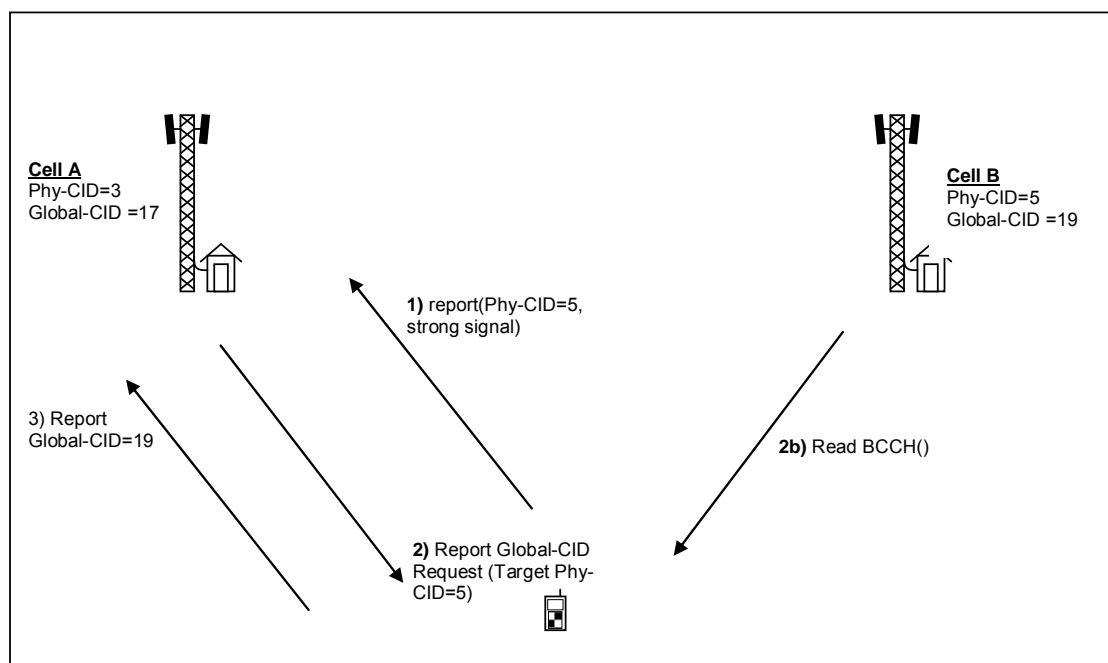



Figura 2.13 – Exemplo de funcionamento do ANR - Intra-LTE/Inter-RAT, [TS36300].

O eNB onde a função de ANR está a ser executada intrói os UEs que está a servir para realizarem medições nas células vizinhas por eles descodificadas. Este procedimento é feito com base em políticas que são definidas pelo controlador de recursos rádio ou RRC. Com base na Figura 2.13, uma vez dada a indicação aos UEs para recolha de medidas, o procedimento seria o seguinte:

1. UE envia as medidas registadas da célula B cujo PCI é o 5;
2. Com base no PCI recebido, o eNB intrói o UE a ler o ECGI, TAC e PLMN ID de todas as células vizinhas por ele descodificadas;
3. Quando o UE consegue descodificar o ECGI da célula B envia-o ao eNB em conjunto com a informação do TAC e de todos os PLMN IDs detectados;
4. O eNB decide adicionar a NR á NRT e poderá usar o PCI e ECGI para:
    a. Procurar o endereço da camada de transporte para o eNB;

b. Actualizar a lista de relações vizinhança;

c. Caso seja necessário, estabelecer a interface X2 para o segundo eNB.

2.2.3.2.2 Inter-RAT/Inter-Frequency ANR

Neste tipo de cenário exemplifica-se o exemplo de um *handover* entre células pertencentes a RAT (Radio Access Technology) diferentes e *handovers* entre células cuja frequência é diferente.

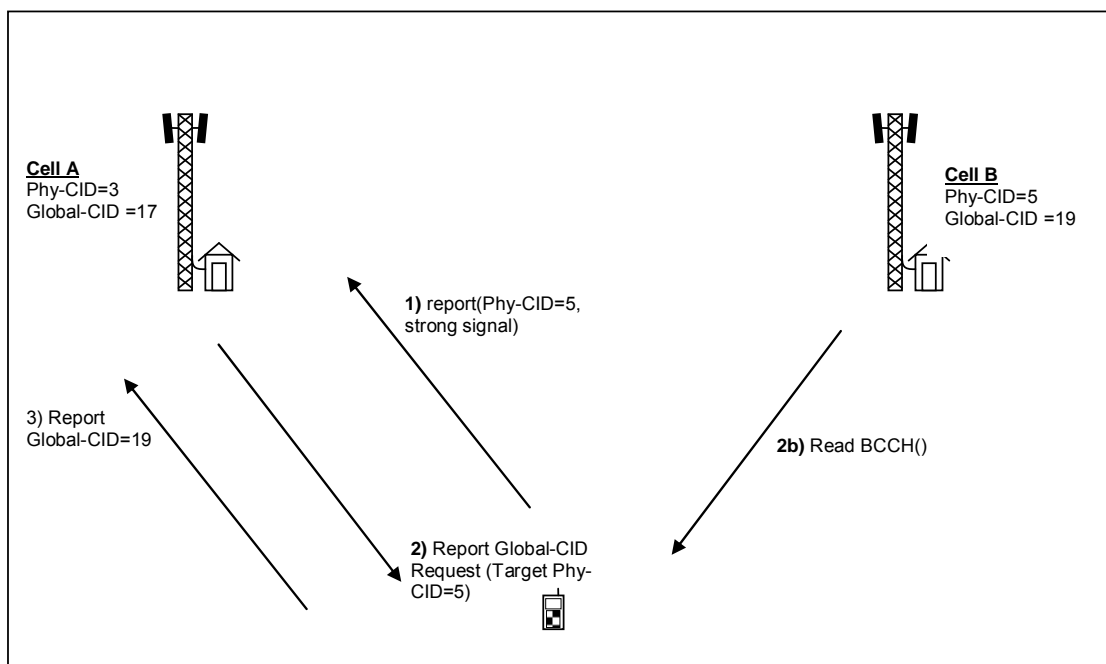



Figura 2.14 – Exemplo de funcionamento do ANR - Inter-RAT/Inter-Freq, [TS36300].

Neste cenário, o eNB da célula que está a servir o UE e na qual está a ser executada a função ANR, instrói o UE para realizar medidas em células de outras RAT / Frequências. Neste cenário o eNB pode usar diferentes políticas para instruir o UE nas realizações de medidas e na escolha do momento certo para as reportar.

1. O eNB instrói o UE para procurar por células vizinhas em outras RAT/Freq. Para isso, o eNB precisa de agendar períodos de *idle* para que o UE possa escutar o meio por células em outras frequências;

2. Uma vez concluída a recolha de dados, o UE reporta o PCI das células detectadas. O PCI será definido pela: frequência da portadora e pelo *Primary Scrambling Code* (PSC) no caso de se tratar de vizinha UTRAN FDD; frequência da portadora e Cell ID no caso de UTRAN TDD; Indicador de Banda, BSIC (Base Station Identity Code)

e BCCH no caso de GERAN e PN (Pseudo-random Noise) *Offset* no caso do CDMA2000[6];

3. Usando o PCI descoberto, o eNB instrói o UE para ler a informação das células detectadas. O UE irá ler o: CGI (Cell Global Identity) e RAC (Routing Area Code) no caso de se tratar de uma célula GERAN; CGI, LAC (Local Area Code) e RAC no caso de se tratar de uma célula UTRAN; CGI no caso de se tratar de uma célula CDMA2000. Para o caso de células com frequências diferentes o eNB instrói o UE usando o PCI recebido para ler o ECGI, TAC (Tracking Area Code) e todas as PLMN (Public Land Mobile Network) ID das células encontradas. Neste último procedimento, o eNB agenda um período de IDLE para o UE para este descodificar a informação das células vizinhas;
4. Após a recolha da informação pretendida da nova célula, o UE reporta o CGI, RAC no caso de uma célula GERAN, CGI, LAC e RAC no caso de UTRAN ou CGI no caso de CDMA2000 ao eNB de serviço. No caso de células de frequências diferentes, o UE reporta o ECGI, TAC e PLMN-ID(s) que foram detectados;
5. O eNB actualiza a sua NRT com as vizinhas inter-RAT/inter-frequência detectadas.

Para o caso particular de células de frequências diferentes, o eNB poderá usar o PCI e ECGI para estabelecimento de uma nova ligação X2 para o eNB pertencente.

2.2.3.3 Configuração automática do Physical Cell ID

Para que um UE consiga sincronizar com uma célula em *downlink*, este terá de obter o PCI da mesma. O PCI é um parâmetro de configuração essencial contido no SCH (Synchronization Channel). Com base no 3GPP, [TS36321], existem no total 504 PCI possíveis numa rede E-UTRAN distribuídos por 168 grupos designados de *Physical Cell Identity Groups*, onde cada um contém três identificadores únicos,

$$PCI = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (2.1)$$

onde $3N_{ID}^{(1)}$pode tomar valores entre 0 e 167, representando o *Physical Cell Identity Group*, e $N_{ID}^{(2)}$ pode tomar valores entre 0 e 2, representando o *Physical Layer Identity*

[6] Tecnologia móvel 3G especificada pelo 3GPP(Third Generation Partnership Project) que utiliza a tecnologia CDMA (Code Division Multiple Access) para transmissão de voz dados e sinalização entre UE e BTS;

dentro do *Physical Cell Identiy Group*. Durante o processo de instalação de um eNB, é atribuído um PCI. Com base nos IDs atribuídos, o eNB transmite o PCI no preâmbulo de *downlink*. Os UEs na área de serviço do eNB recebem o preâmbulo e é com este que são capazes de identificar o eNB.

Segundo, [TR36902], o *Physical Cell ID* de uma célula deverá satisfazer os seguintes critérios:

- O *Physical Cell ID* de uma célula não deve ser igual ao das suas células vizinhas;
- O *Physical Cell ID* das células vizinhas não deverá ser o mesmo.

Segundo o 3GPP, um possível procedimento para a auto-configuração do PCI por parte do eNB poderá ser a que se segue:

1. Quando o procedimento começa, o eNB inicia o período de configuração da *Physical Cell ID*;
2. São definidos um conjunto de *Physical Cell IDs* temporários. Cada célula do eNB escolhe um *Physical Cell ID* temporário;
3. De acordo com a função de ANR, o UE reporta os *Physical Cell ID* das células por ele detectadas e reporta à célula que lhe está a fornecer serviço. Desta forma as células em torno da nova célula recebem o relatório do UE com o *Physical Cell ID* da nova célula. Por outro lado, a nova célula recebe o relatório das células que lhe são vizinha;
4. A nova célula adiciona as células reportadas à sua tabela de relações vizinhança;
5. As células que receberam a informação da célula nova adicionam-na à tabela de vizinhas;
6. Depois de estabelecida uma ligação X2, as células circundantes trocam as suas listas de vizinhas;
7. Uma vez recebida a informação das células vizinhas, a célula nova poderá escolher um *Physical Cell ID* que respeite as condições anteriormente referidas;
8. A nova célula informa depois as suas vizinhas que alterou o seu *Physical Cell ID*, desta vez definitivo.

2.2.3.4 Auto Optimização

A optimização de redes móveis celulares funciona como um processo periódico, na medida em que as tarefas de parametrização, análise de desempenho e optimização se repetem várias vezes na tentativa de alcançar a configuração óptima que maximiza o desempenho da rede. Segundo, [LeFr08], o processo de optimização poderá ser dividido em dois tipos: optimização de parâmetros rádio e optimização de parâmetros de transporte. O processo de *Self-Optimization* é o processo onde a rede é optimizada com base nas medidas obtidas pelo UE, eNB de serviço e eNB vizinhos. Descrevem-se de seguida os procedimentos enunciados pelo 3GPP para optimização nas SON.

2.2.3.4.1 Tracking Area

Para que a rede mantenha um contacto permanente com um UE no estado ECM-IDLE (EPS Connection Management-IDLE), este último deverá actualizar a sua localização sempre que a sua *Tracking Area* (TA) muda, através de um procedimento designado de *Tracking Area Update* (TAU). Cada TA é identificada pelo seu *Tracking Area Identifier* (TAI). De modo a assegurar que o MME tem a localização de cada UE na rede, cada UE terá de realizar um TAU sempre que o TAI do seu eNB de serviço é diferente. O pedido de actualização do TA do UE é enviado através do RACH e como tal, o planeamento dos TA deverá ter em atenção o padrão de tráfego característico da área de cobertura, de modo a minimizar a sinalização entre UE e o eNB. Tipicamente o planeamento das TAs é efectuado durante o processo de implementação da rede e só será mudado em situações extremas, onde existe uma degradação considerável. De modo a facilitar as tarefas de planeamento e optimização de TAs, foi criada a função de *Tracking Area Planning* (TAP) e *Tracking Area Optimization* (TAO).

Segundo [Gray09], aquando da fase inicial de planeamento da rede, poderão ser atribuídos TAIs com base na localização geográfica das estações, densidade populacional, tráfego gerado, etc. Uma vez estabelecidos e configurados os TAI, o algoritmo TAO passa a monitorizar continuamente a ocorrência de TAUs e a carga no RACH, de modo a identificar os eNB mais indicados para mudarem os seus TAIs. Este funcionamento é particularmente útil quando existem mudanças na distribuição de tráfego que não foram previstas no momento em que os TAI foram planeados. Desta forma, consegue-se evitar o fenómeno de ping-pong entre múltiplas TAs.

2.2.3.4.2 Optimização de Mobilidade

A função que visa a optimização da mobilidade dos UEs, também designada de *Mobility Robustness Optimization* (MRO), tem como objectivo melhorar a performance ao nível do *handover* na rede, melhorando a performance entregue ao utilizador e aumentando a capacidade da rede. Isto é feito através do ajuste dos parâmetros da célula, para aumentar ou diminuir os limites de HO (HandOver) com base na análise de *Handover Performance Indicators* (HPI). Estes indicadores poderão ser o número quedas de chamada devido a falhas no *link* rádio, o número de *handovers* falhados ou mesmo a oscilação de *handover* entre células.

Capítulo 3

Planeamento e Optimização em Redes LTE

Neste capítulo, analisam-se as técnicas de planeamento e optimização em redes de quarta geração, tendo em conta os mecanismos de auto-gestão anteriormente enunciados. Este capítulo começa com uma breve introdução aos conceitos fundamentais de planeamento celular em redes de quarta geração, com os processos de dimensionamento para qualidade, cobertura e capacidade. De seguida são analisadas as principais alterações técnicas que são introduzidas com a chegada das redes LTE. Finalmente analisam-se as tarefas de planeamento e optimização previstas pelas SON, para a automatização, algumas das quais serão alvo de implementação.

3.1 Planeamento Celular em LTE

O planeamento celular é um processo pelo qual uma rede celular é dimensionada. Trata-se de um processo iterativo que inclui desenho, síntese e realização de uma rede celular. Em termos práticos, trata-se de determinar que estações são necessárias, que equipamento será usado e como o equipamento será configurado.

Dependendo do estado de maturidade da rede, as tarefas de um planeamento celular podem diferir de operadora para operadora. A Figura 3.1 ilustra, de um modo genérico, as várias etapas que compõem um processo de planeamento de uma rede celular.

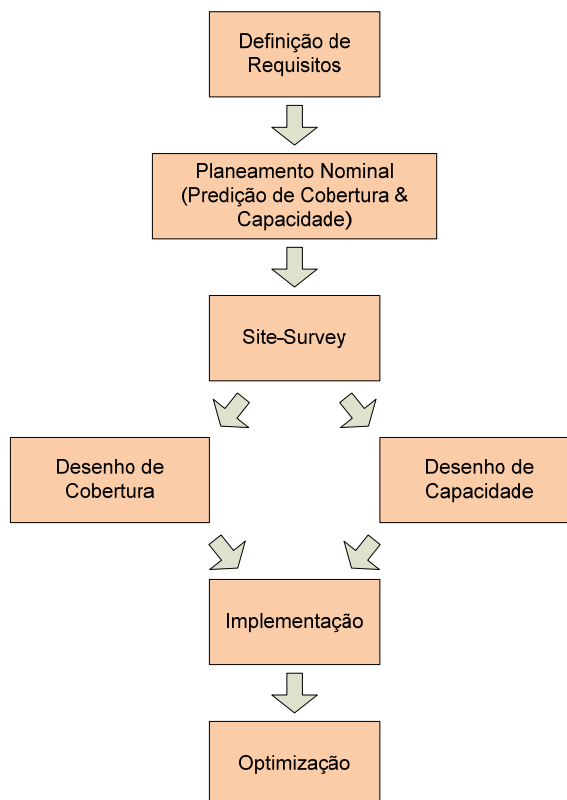



Figura 3.1 – Processo de Planeamento Celular.

Assim, o processo de planeamento celular inicia-se com a definição de requisitos. Nesta etapa é feita uma análise a vários indicadores, nomeadamente de tráfego, cobertura e capacidade actuais da rede, distribuição de tráfego e tipo de tráfego. Segue-se a etapa de planeamento nominal na qual é efectuada uma previsão de cobertura e capacidade, usando ferramentas de planeamento (e.g. Atoll®, MapInfo®[7]). Estas ferramentas permitem calcular o *Link-Budget* com base em modelos empíricos ou, se for o caso, dados estatísticos de redes já existentes e estimar o nível de sinal que será

[7] http://www.pbinsight.eu

recebido pelos utilizadores. Após a previsão de cobertura e capacidade segue-se a etapa designada de *Site-Survey*. Esta etapa consiste tomar contacto com o local onde a BTS poderá ser instalada, e efectuar medidas. Esta etapa permite ter uma melhor percepção da cobertura existente no local, bem como identificar eventuais constrangimentos que possam existir e condicionar as decisões tomadas na etapa anterior (e.g. local de instalação, tipo de HW (HardWare), acessos, etc.). Após o *Site-Survey*, são tomadas as decisões finais quanto à localização, configuração de cobertura e capacidade, e efectua-se o *rollout* das estações. Última mas não menos importante, a etapa de optimização visa a observação dos *Key Performance Indicator* (KPI) das estações instaladas, a fim de identificar eventuais melhorias a aplicar à configuração. Estas melhorias poderão ser um ajuste de potência, alteração do *tilt* das antenas ou ainda activação de funcionalidades, que permitem ajustar a capacidade da BTS ao tipo e à densidade de tráfego existentes.

3.1.1 Dimensionamento da Rede de Acesso

O objectivo do dimensionamento da rede de acesso é estimar a densidade de estações e configuração necessárias para a área de interesse, tipicamente designada de ROI (Region Of Interest). Este processo requer, como vimos anteriormente, um conjunto de indicadores, os quais podem ser divididos nos seguintes tipos: qualidade, cobertura e capacidade.

3.1.1.1 Dimensionamento para Qualidade

Os indicadores de qualidade incluem débito médio e probabilidade de bloqueio de célula. É com base nestes indicadores que é determinada a qualidade de serviço (*Quality of Service* (QoS)) que é oferecida aos utilizadores. É também com base na performance alcançada na periferia da célula que é determinado o raio de célula máximo alcançável. O desempenho alcançado na periferia da célula é quantificado com base no débito máximo na periferia, cobertura máxima usando o MCS (Modulation and Coding Scheme) mais baixo e um raio de célula pré-definido.

3.1.1.2 Dimensionamento para Cobertura

Quanto aos indicadores de cobertura, estes assemelham-se em grande parte aos já usados no dimensionamento das redes de terceira geração UMTS. O dimensionamento de cobertura centra-se essencialmente no cálculo do *Link-Budget*.

É através do *Link-Budget* que é calculado o *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) ou seja, as perdas máximas de potência que podem existir entre as antenas emissoras e as

receptoras. Como parâmetros de entrada, o *Link-Budget* baseia-se na: potência de transmissão, ganho no emissor e receptor, margens de perdas, número de antenas, requisitos de SNR e E_b/N_t e modelos de propagação; É com base no MAPL, que é estimado o raio de cada célula e determinado o número de células necessárias para servir uma determinada área. À semelhança do UMTS, em LTE, a máxima perda de potência é determinada por serviço e o raio de célula é definido pelo serviço mais exigente. A equação 3.1 permite calcular o *Link-Budget* para o canal de *uplink*,

$$\mathrm{L_{UL,pmax}} = \mathrm{P_{TX,ref}} - \mathrm{S_{eNodeB}} - \mathrm{B_{IUL}} - \mathrm{B_{LNF}} - \mathrm{L_{BL}} - \mathrm{L_{CPL}} - \mathrm{L_{BPL}} + \mathrm{G_a} - \mathrm{L_J} \quad (3.1)$$

onde $P_{TX,ref}$ é a potência de transmissão do UE por *Resource Block* (RB), S_{eNodeB} a sensibilidade do eNodeB, B_{IUL}a margem de interferência no *uplink*, B_{LNF} a margem de desvanecimento log-normal, L_{BL} as perdas corporais (*body loss*), L_{CPL}margem de penetração em carros, L_{BPL} a margem de penetração em edifícios, G_a o somatório dos ganhos da BTS e UE e finalmente L_J o total de perdas provenientes das infra-estruturas da estação (e.g. cabos). Tipicamente, para o cálculo do $P_{TX,ref}$ no *uplink* é considerada a potência máxima do UE. Contudo, em alguma bibliografia, poderá ser considerada a potência por RB. Nesse caso, $P_{TX,ref}$ é dado pela equação 3.2,

$$\mathrm{P_{TX,ref}} = \mathrm{P_{TX,UE}} - 10\log_{10}(N^{RB}) \quad (3.2)$$

onde $P_{TX,UE}$ é a potência total do UE e N^{RB} o número de RBs existentes em cada símbolo. O S_{eNodeB}, por seu lado, é dado pela equação 3.3,

$$S_{eNodeB} = \mathrm{NF_{eNodeB}} + \mathrm{TN} + 10\log_{10}(\Delta \mathrm{f}) + \mathrm{SINR_{REQ}} \quad (3.3)$$

onde NF_{eNodeB} corresponde ao *noise figure* do eNodeB, TN o ruído térmico, Δf o espaçamento entre sub-portadoras e $SINR_{REQ}$ o SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) mínimo requerido, tipicamente obtido através de simulações o qual, segundo [HoTo07], poderá ser de -7 dB para um débito mínimo de 64 Kbps e para um receptor (eNodeB) com duas antenas. Opcionalmente poderá ser contabilizado o ganho introduzido por MHA (Mast Head Amplifier).

Através da seguinte equação 3.4 é possível calcular o *Link-Budget* para o *downlink*,

$$\mathrm{L_{DL,pmax}} = \mathrm{P_{TX,ref}} - \mathrm{S_{UE}} - \mathrm{B_{IDL}} - \mathrm{B_{LNF}} - \mathrm{L_{BL}} - \mathrm{L_{CPL}} - \mathrm{L_{BPL}} + \mathrm{G_a} - \mathrm{L_J} \quad (3.4)$$

onde $P_{TX,ref}$ é a potência máxima da BTS por RB, S_{UE} a sensibilidade do UE, B_{IDL} margem de interferência no *downlink*, B_{LNF} desvanecimento log-normal, L_{BL} as perdas corporais (*body loss*), L_{CPL} a margem de penetração em carros (se previsto), L_{BPL} a margem de penetração em edifícios (se previsto), G_a o somatório dos ganhos da BTS e UE e finalmente L_J o total de perdas provenientes das infra-estruturas da estação (e.g. cabos, *splitters*, etc.). Em *downlink* a potência total da BTS é partilhada entre todos os RBs. À semelhança do *uplink*, quantos mais RBs existem, menor é a potência atribuída a cada um. Assim, $P_{TX,ref}$ em *downlink* poderá ser dado pela equação 3.5,

$$\mathrm{P_{TX,ref}} = \mathrm{P_{TX,BTS}} - 10\log_{10}(N^{RB}) \quad (3.5)$$

onde $P_{TX,BTS}$ é a potência total do PA (Power Amplifier) e N^{RB} o número de RBs existentes em cada símbolo e que depende da largura de banda do canal. Em alguma bibliografia é possível encontrar situações onde o $P_{TX,ref}$ é considerado como sendo a potência máxima por sub-portadora. Nesse caso, $P_{TX,ref}$ é dado pela equação 3.6,

$$\mathrm{P_{TX,ref}} = \mathrm{P_{TX,BTS}} - 10\log_{10}\left(\frac{\mathrm{BW}}{\Delta \mathrm{f}}\right) \quad (3.6)$$

onde $P_{TX,BTS}$ é a potência total do PA, BW é a largura de banda do canal e $\Delta \mathrm{f}$ é o espaçamento entre sub-portadoras. Quanto ao S_{UE}, este poderá ser dado pela seguinte equação 3.7,

$$S_{UE} = \mathrm{NF_{UE}} + \mathrm{TN} + 10\log_{10}(\Delta \mathrm{f}) + \mathrm{SINR_{REQ}} \quad (3.7)$$

onde NF_{UE} corresponde ao *noise figure* do UE, TN o ruído térmico, $\Delta \mathrm{f}$ o espaçamento entre sub-portadoras e $SINR_{REQ}$ o SINR mínimo requerido, tipicamente obtido através de simulações e que segundo [HoTo07] poderá ser de -10 dB para um débito mínimo de 1 Mbps e para um receptor (UE) com duas antenas.

Finalmente, para calcular o raio de célula de um eNodeB recorre-se a modelos de propagação que permitem estimar o desvanecimento que o sinal irá sofrer para determinados ambientes de propagação e para determinadas frequências. Modelo espaço livre, *Walfish-Ikegami*, *Okumura-Hata* ou *Longley-Rice* são apenas alguns dos modelos de propagação existentes, [HoTo07].

3.1.1.3 Dimensionamento para Capacidade

O dimensionamento de capacidade dá uma estimativa dos recursos necessários para disponibilizar tráfego numa célula, com um determinado nível de QoS e débito médio. A capacidade de uma célula está limitada por inúmeros factores que incluem nível de interferência, algoritmos de escalonamento de tráfego e esquemas de modulação e codificação usados. Segundo [Syed09], a avaliação da capacidade necessária no processo de planeamento deverá compreender as seguintes tarefas:

- Estimar o débito de célula correspondente com o raio de célula calculado no planeamento de cobertura;
- Analisar estatísticas de tráfego previsto incluindo número de assinantes, tipo de tráfego, densidade de tráfego etc.

3.1.1.3.1 Cálculo do Débito Médio por Célula

À semelhança do UMTS, no LTE o aumento do número de utilizadores numa célula aumenta a interferência e ruído, diminuindo o raio de célula. Através da distribuição e geometria dos utilizadores, é possível estimar o débito possível de alcançar para diferentes raios de célula. Aqui o objectivo é determinar uma estimativa do número de BTSs necessárias com base nos requisitos de tráfego.

Em LTE, o principal indicador de qualidade é a distribuição do SINR numa célula. Esta distribuição é obtida através de simulações do tipo *System-Level* e *Link-Level*, e pode ser directamente mapeada em débito de dados. O SINR depende dos seguintes factores:

- Esquemas de modulação e codificação (MCS);
- Modelo de propagação do canal.

Quanto maior for o MCS maior deverá ser o SINR e vice-versa, o que significa que esquemas de modulação com menor eficiência espectral (e.g. QPSK) requerem valores de SINR baixos, ao passo que esquemas de modulação com maior eficiência espectral (e.g. 64QAM) requerem valores de SINR elevados. O SINR poderá ser estimado de duas formas:

- Utilizando tabelas que relacionam o débito máximo com SINR médio, obtidas através de simuladores do tipo *Link-Level*;
- Utilizando a formula Shannon-Alpha que constitui uma aproximação numérica às simulações do tipo *Link-Level*.

Uma vez concluída a análise de capacidade, a contagem de BTSs obtida por capacidade é comparada com a contagem obtida por cobertura, sendo que o maior das duas definirá o número final de estações necessárias.

3.1.2 Parametrização

A chegada do LTE vem introduzir novos conceitos no planeamento e optimização de redes celulares, com a introdução de novos parâmetros e eliminação de outros. As sub-secções que se seguem descrevem as principais alterações que são introduzidas ao nível da parametrização no planeamento de redes LTE.

3.1.2.1 Tracking Area

No UTRAN, o UE tem de actualizar a sua localização, tanto na rede CORE CS (Circuit Switch) como no CORE PS (Packet Switch) sempre que o Location Area e Routing Area, respectivamente, são alterados. No caso da E-UTRAN, o UE actualiza apenas a sua localização no CORE PS, sempre que a sua TA é alterada. Numa situação de *Circuit Switched Fall Back* (CSFB) o CORE CS envia uma mensagem de *paging* para o UE. Nesse caso o MME mapeia o TA com a LA. TA representa assim o equivalente à Routing Area usada no UTRAN. Como o domínio do LTE é apenas *packet switched*, este não necessita de Location Area.

Uma mensagem de *paging* é difundida pela TA quando o UE está no modo RRC_IDLE. Cada UE poderá estar registado em mais que uma TA e como tal poderá ser necessário difundir uma mensagem de *paging* por várias TA. O problema que se coloca aquando do planeamento da TA diz respeito ao tamanho que esta deverá ter. O planeamento de TA grandes resulta num aumento da carga de *paging*, ou seja, cada mensagem de *paging* tem de ser difundida por um largo número de eNodeB. Contudo, o planeamento de TA grandes permite uma redução do número de actualizações de TA necessárias devido à mobilidade dos utilizadores.

Assim, a TA deverá ser planeada para ser relativamente grande, de modo a minimizar a sinalização e situações de perca de mensagens de *paging*, devido ao atraso resultante do UE atravessar TA diferentes. Se existirem situações onde se preveja uma maior carga de *paging*, poderá proceder-se à redução do tamanho da TA ou criar várias TA de menor dimensão.

3.1.2.2 Physical Cell Identity

O sistema LTE baseia-se todo ele na utilização de *scrambling codes* e *Pseudo-Noise Codes* (PN Codes), para permitir uma distinção entre utilizadores e células assim como para estabelecer um sincronismo entre o UE e o eNB. Na camada física os sinais de sincronismo (incluindo o *Primary Synchronization Signal* (PSS) e o *Secondary Synchronization Signal* (SSS)), possuem um mapeamento único a um PCI. Para além dos sinais de sincronismo, o PCI é também usado como referência para o *Downlink Reference Signal* (DL Reference Signal) e o *Uplink Reference Signal* (UL Reference Signal) incluindo o *Cell-specific Reference Signal* (CRS) e o UE-*specific Reference Signal* (URS). No *DL Reference Signal*, símbolos de referência são alocados em função do tempo e da frequência. No tempo, cada símbolo de referência é transmitido no mesmo símbolo OFDM, ao passo que na frequência o desvio (*frequency shift*) corresponderá ao resto da divisão do PCI por 3 (modulo-3). Desta forma evita-se a sobreposição de sinais de referência. No *UL Reference Signal*, o PUSCH transporta símbolos de referência para desmodulação do sinal à chegada ao eNodeB. Estes símbolos de referência são construídos através de sequências Zandoff-Chu[8], as quais estão divididas em 30 grupos. Isto significa na prática que, para um dado *Physical Resource Block* (PRB) existem 30 sequências diferentes para atribuir, pelo que dificilmente haverá 2 sequências iguais, o que é benéfico para a limitação da interferência inter-célula. Para que isto seja possível é necessário que, às células vizinhas, sejam atribuídas diferentes sequências base. Para isso, é necessário assegurar que os modulo-30 das células potencialmente interferentes sejam diferentes.

Assim, aquando do planeamento dos PCI a atribuir a cada célula, a distância de reutilização de PCI deverá ser tal de modo a impedir que um UE detecte dois PCIs idênticos. Em cada BTS, entre cada sector, os PCIs deverão ser diferente (PCI módulo 3) de modo a proporcionar um desvio na frequência.

No âmbito deste trabalho, foram desenvolvidos dois algoritmos de atribuição automática de PCI: Sequencial ou baseado na mínima distância de reutilização. Estes algoritmos serão descritos no capítulo seguinte.

---

[8] Sequência pertencente à classe de sequências exponenciais complexas cujo sua auto-correlação discreta em sinais não desfasados é nula. Em adição, as sequências Zandoff-Chu possuem uma amplitude constante, [Mans09].

3.1.2.3 Planeamento de Frequências

O planeamento de frequências determina a largura de banda que será disponibilizada a cada célula. Idealmente, cada operador móvel teria à sua disposição, um espectro RF grande o suficiente para permitir um factor de reutilização maior que 1. Contudo, na prática, os operadores têm um espectro RF limitado, pelo que não conseguem atribuir a máxima largura de banda a cada célula, a não ser que, usem um factor de reutilização de 1. Utilizar um factor de reutilização de 1 tem como vantagens:

- Maior eficiência espectral;
- Dispensa um planeamento de frequências;
- Algoritmos de escalonamento mais simples;
- Maior largura de banda por célula.

Contudo, esta opção levanta sérios problemas, entre os quais:

- Aumento de utilizadores provoca um grande aumento da interferência;
- Baixo nível de SNR, principalmente na periferia das células;
- Necessário recorrer a *downtilt* para mitigar interferências;
- *Downtilt* resulta numa redução da área de cobertura.

O LTE está desenhado para funcionar em ambientes onde existe interferência co-canal. Cada eNodeB/sector que opere no mesmo canal, poderá ser interferido pelo sinal proveniente de outros eNodeBs/sectores. O *Carrier to Interference plus Noise Ratio* (CINR) mede a relação entre o sinal da portadora de serviço e os sinais das portadoras interferentes. De modo a minimizar as situações de baixo CINR, foram desenvolvidos os seguintes métodos:

- *Resource Block Group Assignment* (RBGA) – Planear diferentes RBs para cada sector de modo a minimizar os efeitos da interferência;
- *Frequency Selective Scheduling* (FSS) – O escalonador utiliza os RBs que oferecem melhor performance para transmitir os dados para os utilizadores;
- Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) – Baseia-se numa estratégia de escalonamento. Estas estratégias incluem o SFR (Soft Frequency Reuse) e FFR (Fractional Frequency Reuse).

Em geral, o planeamento de frequências, usando um factor de reutilização de 1 aliado a métodos de coordenação de interferência, deverá ser o caminho a seguir, de modo a tirar maior partido da capacidade do LTE.

3.1.2.4 Relações Vizinhança

Ao contrário da UTRAN (WCDMA), na E-UTRAN, dependendo se existe ou não uma ligação RRC com a rede, os UEs possuem apenas dois estados: RRC_CONNECTED e RRC_IDLE. No estado RRC_IDLE o UE monitoriza o canal de *paging*, para detectar eventuais tentativas de chamadas da rede, adquire informação do sistema, efectua medidas nas suas células vizinhas e efectua re-selecção das mesmas, [TS36304]. No estado RRC_CONNECTED o UE recebe/transfere dados de/para a rede. Para isso monitoriza os canais de controlo que estão associados com os canais de dados, para determinar se existem dados para receber e fornece informação da qualidade do canal ao eNodeB de serviço. Também neste estado, o UE efectua medidas nas suas células vizinhas e reporta estas ao seu eNodeB de serviço, com base na sua configuração.

No âmbito deste trabalho, para o estudo de mobilidade dos UEs, por imposição do simulador LTE adoptado e o qual será descrito no capítulo 4, será apenas focado o estado UE RRC_CONNECTED.

3.1.2.4.1 Mobilidade LTE em RRC_CONNECTED

No estado RRC_CONNECTED o UE mantém uma comunicação activa com a rede. Ao contrário do estado RRC_IDLE onde o UE é quem assume o controlo no processo de re-seleção de célula, em RRC_CONNECTED é o eNodeB quem controla o processo de *handover*. O *handover* é baseado em medidas efectuadas pelo UE, cuja parametrização é controlada pelo eNodeB.

Quando é identificada uma célula, cujo sinal recebido apresenta melhores características que o sinal da célula de serviço, o eNodeB despoleta o processo de *handover* (*handover trigger*). Dependendo da tecnologia de rede de acesso e frequência, em modo dedicado, o UE poderá realizar três tipos de *handover*: entre células E-UTRAN com portadoras de igual frequência (*intra-frequency handover*), entre células E-UTRAN com portadoras de diferentes frequências (*inter-frequency handover*) ou entre células de diferentes tecnologias de rede de acesso (*inter*-RAT *handover*).

Mais uma vez, por imposição do simulador LTE adoptado, será apenas abordado o *handover* do tipo intra-frequência, intra-MME/SGW.

3.1.2.4.1.1 Intra-Frequency (Intra-MME/SGW) Handover

Existem três tipos de procedimentos de mobilidade para o *handover* intra-frequência: intra-site, inter-site (usando a interface X2) e inter-site (usando a interface S1). O procedimento de intra-site *handover* acontece quando ambas as células de origem e destino pertencem ao mesmo eNodeB. No caso da célula candidata pertencer a um eNodeB diferente do de serviço, mas ambos pertencerem ao mesmo MME, uma comunicação usando a interface X2 ou S1 toma lugar. Neste caso temos um *handover* do tipo inter-site que utiliza primeiramente a interface X2 e que, caso esta não exista, utiliza a interface S1 para comunicar com o eNodeB destino. Finalmente, se a célula candidata pertencer a um MME diferente da célula de serviço, torna-se necessária uma comunicação usando a interface S1 e assim temos uma *handover* inter-site, inter-MME.

No geral o processo de *handover* intra-frequência poderá ser dividido em três fases: preparação, execução e conclusão. A fase de preparação diz respeito apenas à rede de acesso e consiste em configurar o UE para enviar relatórios de medidas de uma forma periódica e/ou com base em eventos.

Através da mensagem RRC_Connection_Reconfiguration, a qual vem substituir a mensagem Measurement_Control usada no UMTS, são configurados os seguintes eventos, [John10]:

- evento A1 – a célula de serviço torna-se melhor que um limiar absoluto;
- evento A2 – a célula de serviço torna-se pior que um limiar absoluto;
- evento A3 – célula vizinha torna-se *x* dB melhor que a célula de serviço;
- evento A4 – célula vizinha torna-se melhor que um limiar absoluto;
- evento A5 – célula de serviço torna-se pior que um dado limiar A e célula vizinha torna-se melhor que um dado limiar B.

Cabe ao UE, aquando da ocorrência de qualquer um dos eventos anteriores ou mediante um período estabelecido, reportar as medidas efectuadas quer da sua célula de serviço quer das células vizinhas. Através das medidas da própria célula o eNodeB avalia o nível de cobertura e compara-o com o das células vizinhas. O UE pode reportar dois tipos de medidas no processo de avaliação da célula candidata:

- *Reference Signal Received Power* (RSRP) que representa a potência média medida pelo UE;

- *Reference Signal Received Quality* (RSRQ) que representa a qualidade do sinal de referência que o UE recebe da célula candidata.

O *trigger* de *handover* intra-frequência pode ser configurado para reagir pelo valor do RSRP ou RSRQ ou ambos. Se o eNodeB identificar uma célula vizinha candidata, cujas características de cobertura superam as da célula de serviço, então o procedimento de *handover* é iniciado.

O eNodeB começa por enviar a mensagem X2-AP_Handover_Request para o eNodeB destino usando para isso o ECGI da célula destino. Cada célula vizinha é identificada pelo seu PCI não sendo necessário ao UE reportar o ECGI respectivo, uma vez que em princípio existe na base de dados do eNodeB uma relação vizinha com a célula reportada. Caso estejamos perante um cenário onde a função ANR está activa, o eNodeB não terá em princípio nenhuma relação vizinha na sua base de dados, sendo portanto necessário solicitar posteriormente ao UE o ECGI da célula reportada. Após aplicação do algoritmo de admissão, o eNodeB destino sinaliza o eNodeB origem com a informação necessária ao UE, usando a mensagem X2-AP_Handover_Acknowledge. Entre outra informação, esta mensagem contém a mensagem RRC_Connection_Reconfiguration encapsulada, que será enviada pelo eNodeB origem ao UE para que este último se possa ligar ao eNodeB destino. Uma vez concluída a sincronização com a célula destino, o UE sinaliza o eNodeB destino da conclusão do *handover* através da mensagem RRC_Connection_Reconfiguration_Complete. A Figura 3.2 resume, de um modo geral, o processo de *handover* intra-frequência, intra-MME, [John10].

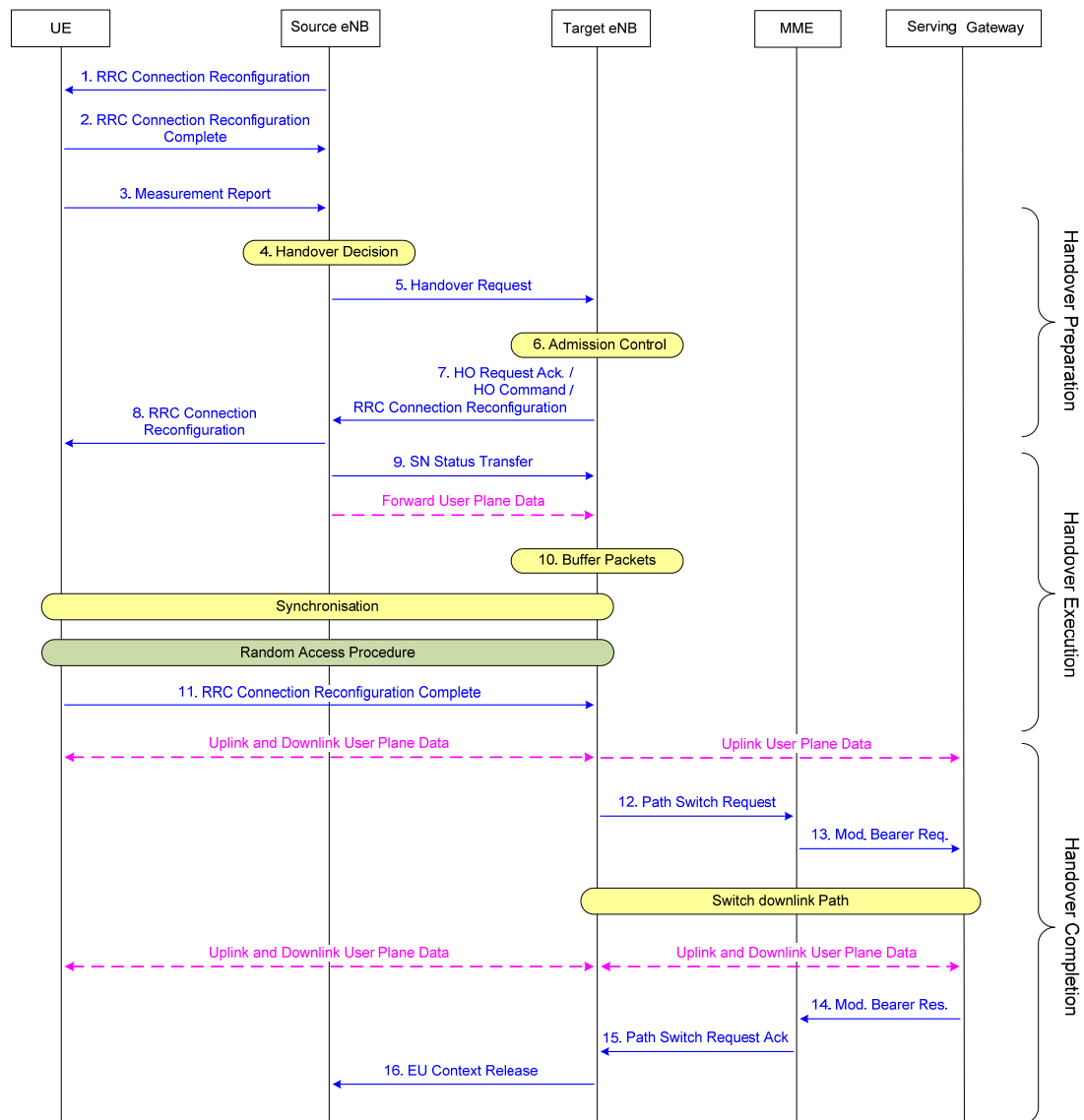



Figura 3.2 – Processo de HO Intra-Frequência, Inter-eNodeB, Intra-MME.

3.1.3 Optimização

No que diz respeito aos processos de optimização de uma rede celular móvel LTE, estes assemelham-se aos já usados na UTRAN e baseiam-se essencialmente na análise de KPIs. Através da análise de indicadores, após a integração e ao longo da vida de um eNodeB, resultam ajustes de parâmetros como potência, *tilt*, relações vizinhança, entre outros, que visam a optimização dos pontos que foram analisados anteriormente: Qualidade, Cobertura e Capacidade.

É na fase de optimização que o papel das SON mais se evidência. A aplicação das funções SON na fase de optimização permite eliminar tarefas, que até agora pertenciam à componente de planeamento. Como descrito no capítulo 2, a optimização de potência, o ajuste de *tilt* com vista à minimização da interferência ou a criação de relações vizinhança,

são tarefas bastante exaustivas e cujo erro humano poderá resultar numa degradação significativa dos KPIs. A realização destas tarefas por parte de funções SON, permite aliviar consideravelmente, a intervenção humana necessária para o *rollout* e optimização de novas BTS.

As secções que se seguem descrevem algumas das soluções propostas para automatizar as tarefas mais comuns, num processo de optimização da rede e as quais serão alvo de implementação no capítulo 4.

3.1.3.1 Resolução Automática do Physical Cell Id

Sempre que existe uma colisão de PCI, a performance dos UEs degrada-se de tal forma que poderão mesmo perder conectividade com a célula de serviço. Outro problema que se levanta com o conflito de PCI prende-se com o relatório de medidas do UE, aquando da necessidade deste fazer *handover* para uma outra célula. Se existir uma célula na proximidade de um UE cujo PCI é idêntico ao PCI da célula de serviço, para além de interferir, esta poderá impedir a recepção correcta do relatório de medidas pela célula de serviço. Assim, a principal prioridade a ter em consideração no processo de atribuição de PCI a cada célula, é maximizar a distância de reutilização dos mesmos, de modo a evitar situações de interferência, quer no UE quer no eNodeB/sector.

Desde as primeiras especificações criadas para o LTE, que têm surgido várias propostas de algoritmos de atribuição de PCI, que tentam minimizar o risco de colisão, tais como as referenciadas em [LLZY10] e [LLZW10]. Com base nos estudos realizados pode-se concluir que existem essencialmente três métodos de atribuição de PCI a um eNB, são eles:

- Escuta dos PCI difundidos pelos eNB vizinhos usando um receptor de *downlink* e através de interrupções coordenadas da transmissão, como se de um UE se tratasse;
- Recepção do relatório de medidas de todos os UEs na área, antes de iniciar a transmissão;
- Estabelecimento de uma ligação SCTP através da interface X2 com eNodeBs vizinhos.

Apesar das soluções indicadas, uma terceira, descrita em [AFGH08], revela-se mais eficiente na medida em que aproveita a função ANR para resolver conflitos de PCI. Esta solução baseia-se em dois métodos para identificação de conflitos de PCI: utilizando a

função ANR e os relatórios de medidas dos UEs. No primeiro método, através de verificações ao nível da NRT, aquando da adição de uma nova NR, é possível identificar célula com ECGI diferentes e com PCIs iguais. No segundo método, através de interrupções na transmissão de cada uma das células do novo eNodeB, é possível, com base em medidas efectuadas pelo UE, identificar células com ECGI diferentes e PCI iguais. Esta última solução será a eleita para implementação a qual é descrita no capítulo 4.

3.1.3.2 Criação Automática de Relações Vizinhança

Tal como foi referido no capítulo 2, no que diz respeito a questões de mobilidade, uma das funções proposta pelas SON é o ANR. Através da função ANR, a rede adapta-se às necessidades de mobilidade de cada utilizador, dispensando a criação manual de relações vizinhança. Esta função torna-se bastante benéfica para o desempenho da rede, pois evita falhas de *handover* por falta de relações vizinhança. No que concerne ao funcionamento desta função, várias propostas têm surgido como a descrita em, [AFGH08]. No âmbito deste trabalho será criado um algoritmo baseado no trabalho desenvolvido por [AFGH08], para criação automática de relações vizinhança e simultaneamente resolução de conflitos de PCI.

3.1.3.3 Optimização de Handover

No que diz respeito à optimização de parâmetros de *handover*, também aqui as SON assumem um papel especial, na medida em que proporcionam algoritmos capazes de, com base em medidas efectuadas pelos UEs, fazer ajustes de parâmetros de modo a melhorar o desempenho da mobilidade dos utilizadores em diferentes situações da rede.

3.1.3.3.1 Métricas de Handover

De acordo com [TIJI10] as métricas de optimização de *handover* poderão ser divididas em métricas de sistema e métricas de controlo. Nas métricas de sistema temos o RSRP e o SINR. Ambos são periodicamente medidos pelo UE de modo a permitir a este, saber qual a melhor célula para se ligar e quais as células candidatas. O RSRP para cada célula ($RSRP_{c,ue}$) poderá ser medido da seguinte forma,

$$\mathrm{RSRP_{c,ue}} = \mathrm{P_c} - \mathrm{L_{pl}} - \mathrm{L_{sf}} \qquad (3.8)$$

onde P_c é a potência transmitida pela célula, L_{pl} as perdas de percurso entre um UE e a célula e L_{sf} as perdas por difração com uma distribuição log-normal e desvio padrão de 3

dB. Adicionalmente o SINR medido ao nível do UE ($SINR_{ue}$) é baseado na relação entre o RSRP da célula de serviço e o RSRP da célula candidata com o sinal mais forte e poderá ser descrito como,

$$\mathrm{SINR_{ue}} = \mathrm{RSRP_{conn}} - \mathrm{RSRP_{int,noise}} \tag{3.9}$$

onde $RSRP_{conn}$ representa o nível de sinal recebido da célula de serviço e $RSRP_{int,noise}$ no nível de sinal da célula interferente, candidata a *handover*.

3.1.3.3.2 Indicadores de Desempenho

De modo a manter uma conectividade contínua numa comunicação, torna-se necessária uma avaliação contínua do nível de QoS percepcionado pelos utilizadores. Para alcançar este objectivo é efectuado um cálculo contínuo dos HPI. Segundo [TR36902] os principais indicadores de performance de *handover* poderão ser resumidos à taxa de falhas de *handover* (Handover Failure Rate (HOF)), Taxa de oscilação de *Handover* (Ping-Pong Handover Rate (HPP)) e taxa de drops (Dropping Rate (DR)). O indicador de performance de falha de *handover* (HPI_{HOF}) é o número N de *handovers* falhados (N_{HOfail}) dividido pelo número de tentativas de *handover* (N_{HOatmp}),

$$\mathrm{HPI_{HOF}} = \frac{\mathrm{N_{HOfail}}}{\mathrm{N_{HOatmp}}} = \frac{\mathrm{N_{HOfail}}}{(\mathrm{N_{HOsucc}} + \mathrm{N_{HOfail}})} \tag{3.10}$$

onde N_{HOatmp} corresponde à soma dos *handover* com sucesso (N_{HOsucc}) com o número de *handovers* falhados (N_{HOfail}). Já o indicador de performance de oscilação de *handover* mede a taxa a que uma chamada é entregue da célula A para a célula B e é devolvida à célula A, num período de tempo que é inferior a um designado período crítico (T_{crit}). O HPI_{HPP} é calculado como o número de *handovers* por oscilação (N_{HOpp}), dividido por ele mesmo somado do número de *handovers* que não sofreram oscilação (N_{HOnpp}) e o número de *handovers* falhados.

$$\mathrm{HPI_{HPP}} = \frac{\mathrm{N_{HOpp}}}{\mathrm{N_{HOpp}} + \mathrm{N_{HOnpp}} + \mathrm{N_{HOfail}}} \tag{3.11}$$

Finalmente, o indicador de performance de chamadas caídas (HPI_{DC}), mede a probabilidade de uma chamada cair antes de um *handover* terminar e é calculado como a relação do número de chamadas caídas ($N_{dropped\ call}$) sobre o número de chamadas aceites, ($N_{acceptable\ call}$).

$$\mathrm{HPI_{DC}} = \frac{\mathrm{N_{dropped\ call}}}{\mathrm{N_{acceptable\ call}}} \tag{3.12}$$

Capítulo 4
Simulação de Redes Auto-Geridas

Neste capítulo, descreve-se um conjunto de funções implementadas que permitem simular algumas das funcionalidades SON descritas no capítulo anterior. Este capítulo começa por apresentar o "*System Level Simulator of LTE Networks*" do Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering da Universidade Tecnológica de Vienna, Áustria (TU- WIEN[9]), o qual é tido como a base para o desenvolvimento das funções SON pretendidas. Posteriormente decrevem-se as funções de atribuição, detecção e resolução de PCI, ANR e optimização de *handover* implementadas, com especial atenção aos algoritmos desenvolvidos. Finalmente apresenta-se uma interface gráfica que permite a interacção do utilizador com o simulador.

[9] http://nt.tuwien.ac.at/ltesimulator

4.1 System Level Simulator of LTE Networks

Ao longo do processo de normalização do LTE, vários simuladores têm vindo a ser desenvolvidos por fabricantes e operadoras móveis. Para além de empresas, algumas instituições académicas têm vindo igualmente a desenvolver simuladores LTE. Um caso prático de um simulador LTE desenvolvido em ambiente académico é o "*System Level Simulator of LTE Networks*". Este simulador do tipo, como o próprio nome indica, *System-Level*, implementado em Matlab®, permite auxiliar a tarefa de dimensionamento de capacidade de uma rede ao possibilitar o cálculo das distribuições de erros, débitos máximos alcançáveis, etc, [IWRu10].

4.1.1 Arquitectura do System Level Simulator

A Figura 4.1 ilustra os vários blocos que compõem o "*System Level Simulator of LTE Networks*" proposto pelo TU-WIEN, [IWRu10].

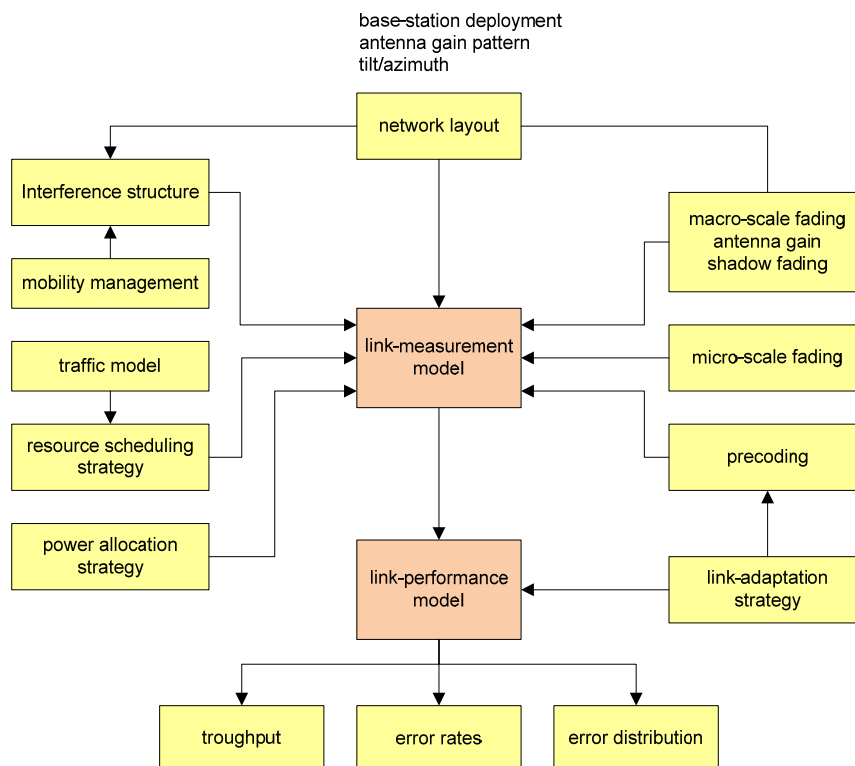



Figura 4.1 – Esquema de blocos do LTE System-Level Simulator [IWRu10].

Os blocos essenciais que compõem este simulador são o *Link-Measurement Model*, responsável pela adaptação da ligação e pela atribuição de recursos e o *Link-Performance Model*, responsável por determinar o *Block Error Rate* (BLER) [IWRu10]. Para o *Link-Measurement Model* contribui o *layout* da rede, nomeadamente a configuração de cada eNodeB, modelos de propagação, ganho das antenas, mobilidade,

mapas de tráfego e políticas de gestão de recursos. Para o *Link-Performance Model* contribui o *Link-Measurement Model* e a estratégia de adaptação ao canal. Deste último são obtidos indicadores de débitos, taxas de erro e respectivas distribuições, SINR, etc..

4.1.2 Modo de Funcionamento

No que diz respeito ao seu funcionamento, este divide-se em duas fases. A primeira fase diz respeito à criação do cenário para simulação, enquanto a segunda diz respeito à simulação propriamente dita da comunicação entre eNodeB e UE, com base em intervalos de transmissão, apelidado na maior parte das vezes de TTI (Transmission Time Interval).

Cada simulação assenta num conjunto de parâmetros previamente definidos pelo utilizador, os quais determinam a configuração a aplicar aquando da criação da rede. Em [MeIk11] poderá ser encontrada uma descrição detalhada de cada parâmetro de configuração existente na versão original do simulador.

Sempre que é iniciada uma simulação, o simulador começa por carregar as curvas de BLER. Estas curvas permitirão ao UE identificar o CQI a reportar ao eNodeB para um dado BLER. De seguida são criados os eNodeBs. Dependendo da configuração especificada pelo utilizador, estes poderão ser gerados aquando de cada simulação, ou através do carregamento de um ficheiro de configuração proveniente de ferramentas de planeamento, como por exemplo Atoll®. No que diz respeito à especificação manual da rede, esta está limitada apenas à criação de clusters hexagonais de eNodeBs tri-sectorizados, igualmente espaçados entre si e com a mesma configuração. A Figura 4.2 ilustra o *layout* típico de uma simulação.

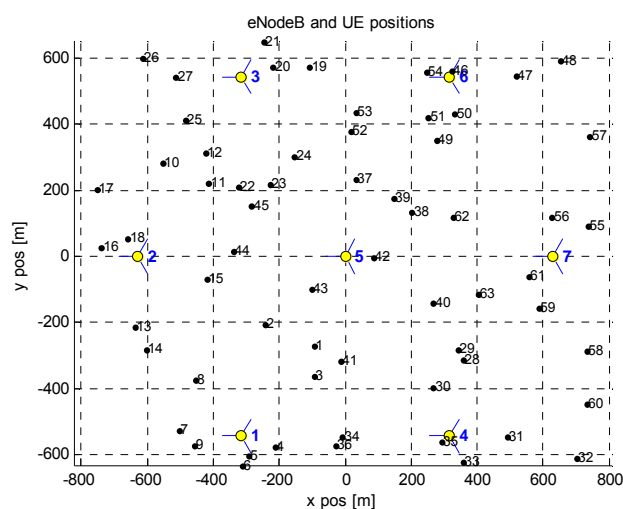



Figura 4.2 – Exemplo de um cenário de simulação usando o LTE System-Level Simulator.

Com base no modelo de propagação especificado é criada uma matriz de atenuação com uma dada resolução medida em unidades metro/pixel. Através do tipo de antena, igualmente especificada pelo utilizador, o simulador calcula o padrão de ganho correspondente a cada sector de cada eNodeB. É com base na matriz de atenuação e na matriz de ganho de cada sector, que o simulador calcula a matriz final de atenuação entre o eNodeB e o UE, utilizando a equação,

$$Pathloss_{Total} = Max(Pathloss - G_{Tx} - G_{Rx}, MCL) \quad (4.1)$$

onde G_{Tx} é a matriz de ganho do emissor, G_{Rx} o ganho do receptor, que é tido como 0 dB e MCL (*Minimum Coupling Loss*) que corresponde ao valor de perdas mínimo que deverá existir entre o transmissor e o emissor (incluindo perdas nos cabos, *splitters*, etc.). Será com base nesta matriz de atenuação que cada UE irá calcular a sua potência recebida utilizando a seguinte equação,

$$Pwr_{Rx} = Pwr_{Tx} - Pathloss_{Total} \quad (4.2)$$

onde Pwr_{Rx}é a potência do receptor, Pwr_{Tx} a potência do transmissor e $Pathloss_{Total}$ a atenuação total entre o emissor e o receptor. Uma vez terminada a criação de cada eNodeB procede-se à criação de uma designada, matriz sector. A cada ponto (x_pos, y_pos) da matriz de atenuação anteriormente calculada, corresponde uma dada atenuação e a qualquer UE que esteja localizado nesse ponto, será atribuído um determinado eNodeB e sector. A Figura 4.3 ilustra a estrutura da matriz sector calculada antes de cada simulação, através do *Link-Budget* especificado pelo utilizador.

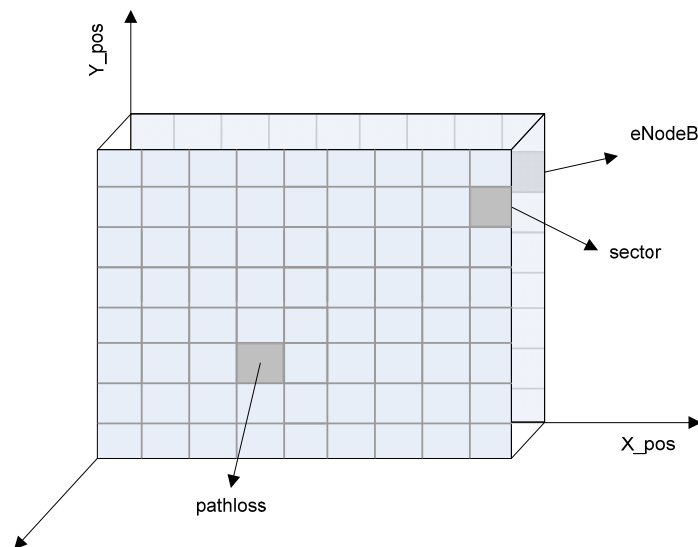



Figura 4.3 – Estrutura da matriz de atenuação usada pelo LTE System-Level Simulator.

Desta forma, evita-se que a cada nova posição de um UE, se calcule um novo *Link-Budget* para determinar a qual eNodeB/sector este pertence. Relativamente à distribuição e densidade dos utilizadores numa designada região de interesse, denominada muitas das vezes de ROI, esta poderá ser determinada por uma de duas formas: aleatoriamente ou através de mapas de tráfego importados para o simulador.

Uma vez criados os eNodeBs, procede-se à criação dos UEs. Cada UE possui uma posição inicial, uma velocidade constante e um modelo de deslocamento, que poderá ser aleatório ou em linha recta. A cada UE é também atribuído um sector inicial e um canal de *downlink*. Uma vez gerada a rede dá-se início à fase de simulação. Cada TTI tem 1 ms e em cada período destes, tanto o eNodeB como o UE, recebem, processam e enviam dados para um *buffer*, ou seja, em cada período, um dado UE ou eNodeB só recebe e envia uma vez, não havendo portanto uma comunicação completa num só TTI. A Figura 4.4 ilustra o processo de comunicação entre UE e eNodeB.

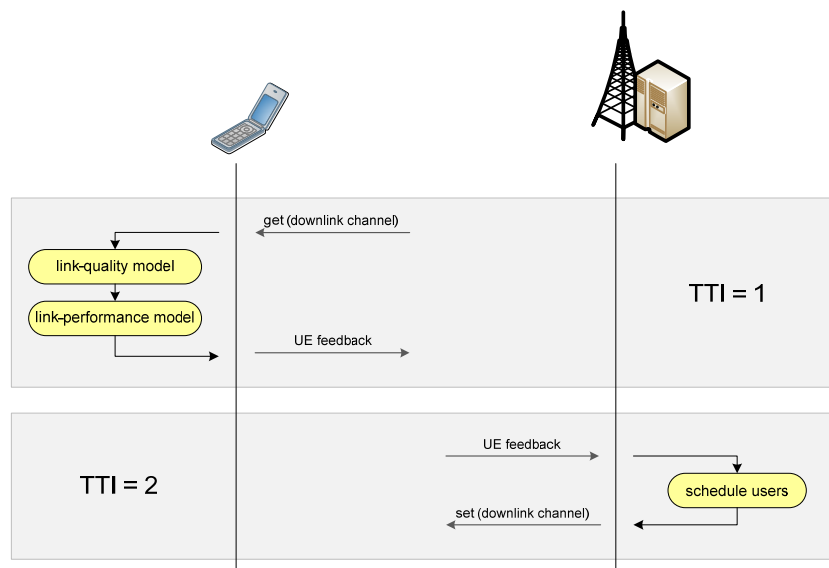



Figura 4.4 – Processo de comunicação entre UE e eNB usado pelo LTE System-Level Simulator.

No instante TTI = 1 o UE vai buscar ao seu canal de *downlink* a informação colocada pelo seu eNodeB/sector de serviço no instante TTI – 1. No mesmo TTI, o UE estima a qualidade do canal e calcula o CQI. Uma vez efectuados os cálculos necessários, o UE, no mesmo TTI, coloca num *buffer*, o qual simula o canal de *uplink*, os dados que pretende transmitir ao eNodeB. No instante TTI = 2, o eNodeB respectivo, retira do *buffer* os dados colocados pelo UE no instante TTI – 1 e procede ao agendamento da transmissão para o utilizador, com base no feedback por ele fornecido. No mesmo TTI, o eNodeB coloca a

informação que pretende transmitir ao UE. Dentro de cada TTI, começa-se por mover cada utilizador de acordo com o modelo de deslocamento determinado pelo utilizador. A cada iteração verifica-se se todos os UEs se mantêm dentro da ROI. Se algum UE sair fora da ROI, este será colocado aleatoriamente numa nova posição e atribuído a um novo eNodeB/sector.

Em cada iteração, cada utilizador estima a qualidade do seu canal de *downlink*, através do cálculo do seu SINR em cada RB e da tradução deste num CQI e BLER, usando as curvas carregadas no início da simulação. Segundo [IWRu10], o BLER não deverá ser maior que 10%. Uma vez determinado, cada utilizador transmite o CQI ao seu eNodeB de serviço. O eNodeB por sua vez, e recordando que no instante TTI estão a ser processados os dados provenientes do instante TTI - 1, recebe o feedback de cada UE e agenda a transmissão para este com base no CQI recebido.

4.2 Implementação de Funções de Auto-Gestão

Tomando como ponto de partida o trabalho, que tem vindo a ser desenvolvido pelo TU-WIEN no "*System Level Simulator of LTE Networks*" e beneficiando da estrutura modular que caracteriza este simulador, foi efectuado um conjunto de alterações que conferem a este a capacidade de simular as funcionalidades SON de atribuição e resolução de PCI, ANR e optimização de *handover*. Apesar de se tratar de um simulador do tipo *System-Level*, cujo objectivo é o estudo de capacidade em redes LTE, a sua estrutura de comunicação, o *Link-Budget* baseado em modelos de propagação empíricos de pequena e larga escala, incluindo desvanecimento rápido e lento, e a aplicação de modelos de tráfego, tornam-o ideal para a simulação de funcionalidades que reflectem o planeamento e a optimização celular.

Para munir este simulador das funcionalidades SON pretendidas, foi necessário efectuar alterações de fundo em várias partes do simulador. As alterações efectuadas podem ser agrupadas em dois tipos: usabilidade e funcionalidade. As alterações de usabilidade visam conferir ao simulador a capacidade de simular cenários mais personalizados e resumem-se a:

- Importação de mapas geo-referenciados (permite o cálculo automático de distâncias);

- Definição manual da configuração de cada eNB, incluindo potência de saída, número de sectores e respectivas orientações, modelo da antena, MDT (*Mechanical Down-Tilt*) e EDT (*Electrical Down-Tilt*), altura e cota;
- Criação de eNB com 1, 2 ou 3 sectores;
- Definição manual das características do canal incluindo frequência de operação, largura de banda, modo de transmissão e modelos de propagação de larga e pequena escala, incluindo desvanecimento por difracção (shadow *fading*);
- Definição da velocidade, tipo de tráfego, e número de utilizadores;
- Guardar cenários e resultados em formato de projecto (.mat) para análise futura.

No que diz respeito às alterações ao nível da funcionalidade, estas tem como objectivo conferir ao simulador a capacidade de simular as funções SON anteriormente referidas e resumem-se a:

- Implementação ao nível do UE de funções que permitem a este, com base no sinal da sua célula de serviço e das células interferentes, gerar relatórios de medidas e despoletar um *handover* atendendo a um determinado valor de Histerese e TTT (Time-To Trigger);
- Implementação de um algoritmo de *handover* intra-frequência (Intra-MME/SGW) ao nível da célula de cada eNodeB que permite o processamento de relatórios de medidas (*Measurement Report*) e reconfiguração dos UEs (RRC *Connection Reconfiguration*), [John10];
- Implementação de funções que verificam as condições do canal aquando do processo de *handover*;
- Implementação de um mecanismo de criação e gestão automática de relações vizinhança (ANR);
- Implementação de funções que permitem atribuir, de forma sequencial ou com base numa dada distância mínima de reutilização, PCIs a cada célula;
- Implementação de funções que, com auxilio da função ANR, detectam e resolvem conflitos de PCI;
- Implementação de funções que, com base em relatórios de medidas dos UEs, permitem optimizar os parâmetros de Histerese e TTT ao nível da célula;
- Implementação de funções que recolhem dados que permitem a cada simulação gerar dados estatísticos.

As secções que se seguem descrevem com maior rigor, as alterações efectuadas ao nível da funcionalidade do simulador que conferem a este a capacidade de simular as funções já referidas. Nota que, a versão do simulador base usada ao longo de todo este trabalho é a 1.3 r427.

4.2.1 Atribuição Automática de PCI

No âmbito deste trabalho, a atribuição de PCI a cada eNodeB/sector é feita sem qualquer restrição havendo apenas um mecanismo que, com base numa lista de PCI disponíveis, atribiu um novo PCI tentando ao máximo minimizar o risco de interferência com os PCI já atribuídos aos eNodeB/sectores já existentes.

No que diz respeito à geração de PCI para atribuição, esta é baseada no método descrito na Secção 2.2.3.3 onde são criados 167 *Physical Cell Identity Group* e onde cada grupo possui três PCI para alocação (Physical Layer Identity). A alocação de PCI, aquando da preparação de cada simulação, é feita com base nos seguintes critérios:

- A cada eNB está alocado um e só um *Physical Cell Identity Group*;
- Às células co-localizadas deverá ser atribuído um PCI por ordem ascendente do *Physical Layer Identity*.

Na Tabela 4.1 pode ser observado o modo como os PCI são distribuídos ao longo dos 167 grupos.

Tabela 4.1 – Tabela de PCI gerada para atribuição.

	0	**1**	**2**	**…**	**166**	**167**
0	0	3	6	…	498	501
1	4	7	10	…	502	1
2	8	11	14	…	2	5

O modo como cada PCI é atribuído a cada uma das células poderá ser sequencial, onde a cada eNodeB é atribuído um grupo de PCI, ou utilizando o método da mínima distância de reutilização, onde um algoritmo atribui a cada eNodeB um grupo de PCI, tendo em conta os PCI atribuidos aos eNodeBs vizinhos, cuja distância é inferior à distância mínima de reutilização definida pelo utilizador. Através do primeiro método, utilizando somente a tabela anterior, poderá ser criado um *cluster*, cujo número de células poderá ir até às 504 sem que algum PCI seja repetido, contudo, esta situação mantém o problema da interferência com células de *clusters* adjacentes. O segundo método, baseia-se num algoritmo que com base na matriz sector, analisa quais os potenciais sectores interferentes num dado sector e a distância a que se encontram, e desta forma atribui um

grupo de PCI diferentes dos utilizados pelos eNodeBs interferentes e que se encontram a uma distância menor que a distância de reutilização.

4.2.2 Resolução de Conflitos de PCI

Tal como se pode ver na secção anterior, um dos problemas que advêm da atribuição de um PCI de forma automática, prende-se com a distância de reutilização dos mesmos. À semelhança da atribuição de um SC no UTRAN (WCDMA), também a atribuição de um PCI na E-UTRAN deverá ter em conta a distância de reutilização, de modo a minimizar a hipótese de interferência.

A atribuição automática de um novo PCI a uma célula poderá fazer com que esta provoque interferência numa outra célula na sua vizinhança mas que não lhe é conhecida. Neste contexto, alguns estudos têm sido realizados, nomeadamente o descrito em [AFGH08], o qual propõe duas soluções para minimizar o risco de interferência entre duas células, aquando da atribuição de um novo PCI. Numa primeira abordagem, este trabalho propõe uma atribuição local de um novo PCI à célula interferente, sendo que o PCI atribuído deverá ser diferente do conjunto de PCI utilizados pelas células vizinhas e pelas células vizinhas das vizinhas. Uma vez reunidos todos os PCI das células vizinhas, é gerado um novo PCI e actualizada cada relação vizinhança das células vizinhas. A segunda solução proposta para este trabalho baseia-se na criação de períodos temporais aleatórios, onde a célula de serviço interrompe a sua transmissão permitindo ao UE escutar outras células cuja assinatura é idêntica à célula de serviço. Uma vez identificada uma célula com a mesma assinatura, o UE informa o eNodeB o qual, por sua vez, informa o OSS para que uma acção seja tomada.

No âmbito deste trabalho decidiu-se implementar o primeiro mecanismo proposto por [AFGH08] para identificação e resolução de conflitos de PCI. No que diz respeito ao segundo mecanismo proposto por este estudo, o autor não é claro quanto à forma como um UE gere a comunicação com a sua célula de serviço quando recebe um sinal de uma outra célula com o mesmo PCI. Podendo ocorrer uma situação onde ambos os sinais possuem a mesma frequência o móvel poderá não conseguir comunicar com qualquer uma das células. Perante a hipótese do UE não conseguir comunicar com a sua célula de serviço, este segundo mecanismo não foi considerado e, desta forma, a detecção de conflitos de PCI será apenas baseada nos relatórios de medidas enviados pelos UEs. A Figura 4.5 ilustra dois algoritmos desenvolvidos para a detecção e resolução de PCI usando a função ANR como auxílio.

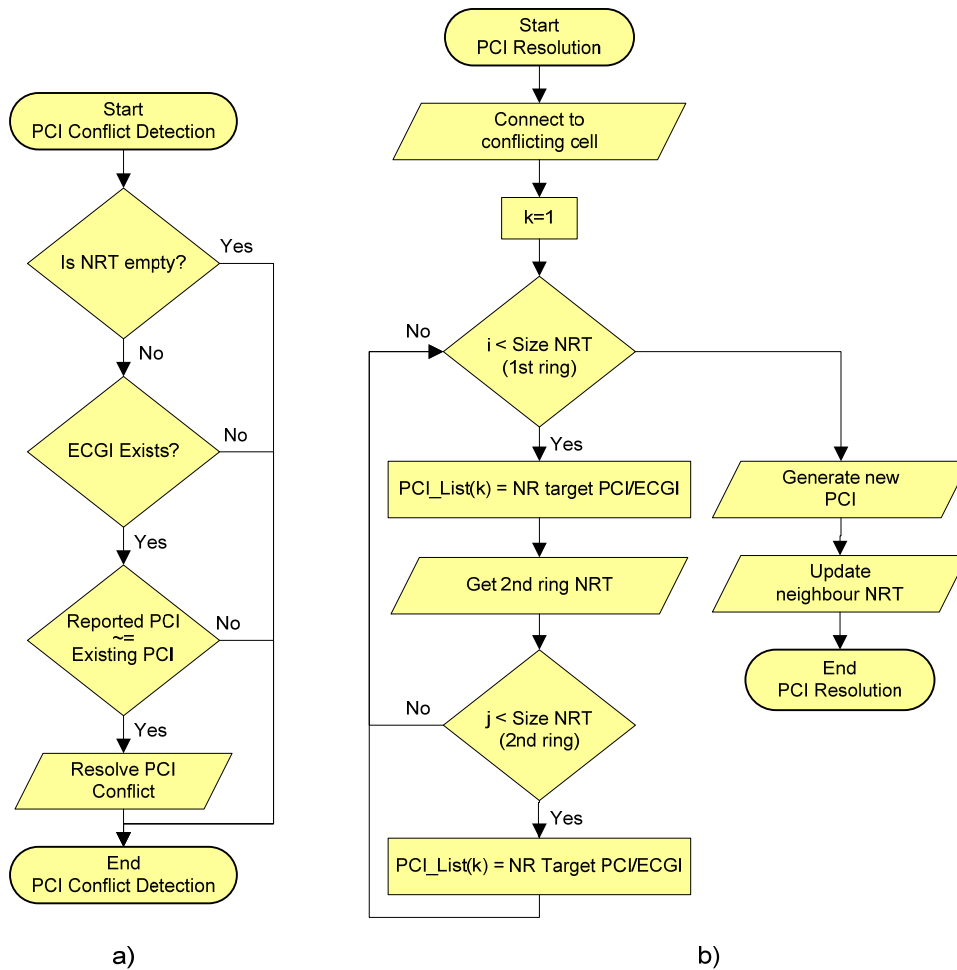



Figura 4.5 – Algoritmo de detecção (a) e resolução (b) de PCI através da função ANR.

No que diz respeito à detecção de conflitos de PCI entre células diferentes, uma vez iniciado o processo de *handover* intra-frequência, o eNodeB verifica se o PCI da nova célula já existe na sua NRT. Se existir, este vai verificar se o ECGI dessa mesma célula é igual ao ECGI da NR já existente na sua NRT. Se o ECGI for diferente, concluiu-se que existem pelo menos duas células na proximidade que possuem o mesmo PCI. Para resolver esta situação, o eNodeB contacta o eNodeB/sector correspondente à NR existente com o mesmo PCI usando o respectivo ECGI e solicita a geração de um novo PCI. O eNodeB/sector contactado, por seu lado, alertado para a existência de conflito de PCI, reune os PCI das suas células vizinhas e das vizinhas das vizinhas, e com base neles gera um novo PCI e reporta-o de volta para o eNodeB/sector origem. O eNodeB/sector origem, por seu lado, actualiza a NR respectiva. Uma vez resolvido o conflito, o eNodeB origem estabelece uma ligação com o eNodeB destino e solicita a alocação dos recursos necessários para efectuar o *handover* do UE. Para além da alocação de recursos, o eNodeB origem transmite ao eNodeB destino toda a sua NRT.

Nesta fase, o eNodeB de destino começa por comparar as NR da célula origem com as suas. Se for identificado um par de NR pertencente a ambas as células, cujo PCI é idêntico mas o ECGI é diferente, então concluiu-se desta forma que existe um outro conflito de PCIs. Uma vez identificado um conflito de PCI dá-se início ao algoritmo de resolução.

Na fase de resolução do conflito de PCI, à semelhança do processo anterior, o eNodeB/sector de destino começa por reunir as NR das células vizinhas e vizinhas das vizinhas. São reunidos os PCIs de todas as NR e com base nestes é gerado um novo PCI que será atribuído à célula conflituosa. Uma vez gerado e atribuído o novo PCI, todas as NR das células vizinhas, são percorridas e actualizadas com a informação do novo PCI atribuído. Nota que, o processo de resolução de conflitos entre PCIs atribui apenas um novo PCI à célula conflituosa e não um novo *Physical Identity Group* ao eNodeB. Esta opção foi tomada para minimizar o número de interrupções de transmissão entre eNodeB e UE, ou seja, períodos em que as células teriam de mudar de PCI. Contudo, numa situação real a alocação de um novo *Physical Identity Group* deverá ser considerada de modo a manter a coerência nos desvios de frequência entre sectores. Partiu-se também do princípio que dois eNodeB, relativamente próximos e com o mesmo *Physical Identity Group*, não possuem necessariamente todos os sectores a interferirem uns com os outros.

4.2.3 Criação Automática de Relações Vizinhança

Tomando como ponto de partida o trabalho realizado em [AFGH08] foi desenvolvido um algoritmo que, partindo do "*System Level Simulator of LTE Networks*", permite simular o funcionamento da função ANR para um cenário de *handover* intra-frequência entre eNodeB da mesma MME. Tal como proposto pelo 3GPP, [TS36300], o algoritmo baseia-se na construção de uma NRT com base nas células que são reportadas por cada UE, quer seja pelo envio periódico ou por evento, do relatório de medidas.

Para tornar cada UE capaz de dispoletar eventos que o permitam reportar medidas, foram feitas alterações de modo a possibilitar-lhe efectuar a cada TTI, a medição do RSRP da sua célula e das células vizinhas e com base nos valores obtidos criar eventos. Por outro lado, ao nível do eNodeB tornou-se necessário conferir a este a capacidade de analisar os relatórios de medidas, enviados por cada UE e com base neles, responder com mensagens de reconfiguração. Aliás, é no sector de cada eNodeB que se centra a

função ANR, responsável por adicionar ou remover NR e por gerir os KPIs relativos aos handovers efectuados.

Assim, o UE poderá utilizar o RSRP ou RSRQ como medida, para determinar a qualidade do sinal proveniente da sua célula de serviço. O "*System Level Simulator of LTE Networks*", na sua versão mais actual, não implementa quaisquer mecanismos de *handover*, sendo apenas efectuada a mudança de célula sempre que o utilizador sai fora da ROI. Assim, como uma aproximação ao cálculo do RSRQ, cada UE utiliza a média de todos os valores de SINR medidos para cada RB, como indicador da qualidade do sinal recebido. Não sendo este o método correcto de avaliação da qualidade do sinal na célula, esta acaba por se revelar uma medida suficientemente eficaz para a demonstração do funcionamento do algoritmo de ANR.

4.2.3.1 Modo de Funcionamento

Em cada ciclo de transmissão, cada UE verifica o nível de sinal recebido da sua célula de serviço. Sempre que o sinal recebido da célula de serviço desça abaixo dos -100 dBm, o UE inicia o processo de medição do nível de sinal recebido das suas células interferentes, ao mesmo tempo que verifica se alguma destas possui o mesmo PCI que a sua célula de serviço. Se existir alguma célula interferente cujo PCI é idêntico ao PCI da célula de serviço o UE entra numa designada situação de bloqueio. Nesta situação o UE vê-se impedido de transmitir enquanto o PCI da célula interferente não for resolvido.

Se não for verificada a existência de uma situação de bloqueio, o UE prosegue com as medidas e verifica se existem condições para despoletar o processo de *handover*. A forma como é despoletado um evento do tipo A3 é idêntica à proposta pelo 3GPP [TS36300]. Para que um evento do tipo A3 ocorra, é necessário que o sinal proveniente de uma qualquer célula interferente, obedeça à condição abaixo durante um período designado de TTT (Time-To-Trigger),

$$\mathrm{RSRP}_{\mathrm{i,ue}} > \mathrm{RSRP}_{c,ue} + (\mathrm{Q}_{hys} + \mathrm{Q}_{offset}) \tag{4.3}$$

onde $\mathrm{RSRP}_{i,ue}$o nível de sinal recebido da célula interferente, $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{c,ue}}$ é o nível de sinal recebido pela célula de serviço, Q_{hys} o valor de histerese de *handover* e Q_{offset}o valor de *offset* de *handover*. Sempre que a condição acima se verifica por um período mínimo equivalente ao TTT, o evento A3 é despoletado pelo UE, e um relatório de medidas é enviado ao eNodeB/sector de serviço. Mesmo que a condição acima não se verifique, o

UE é obrigado a transmitir periodicamente um relatório de medidas, de modo a evitar situações de degradação de *handover* por uma subita alteração das condições de recepção. A Figura 4.6 ilustra a situação necessária para que o UE gere um evento do tipo A3.

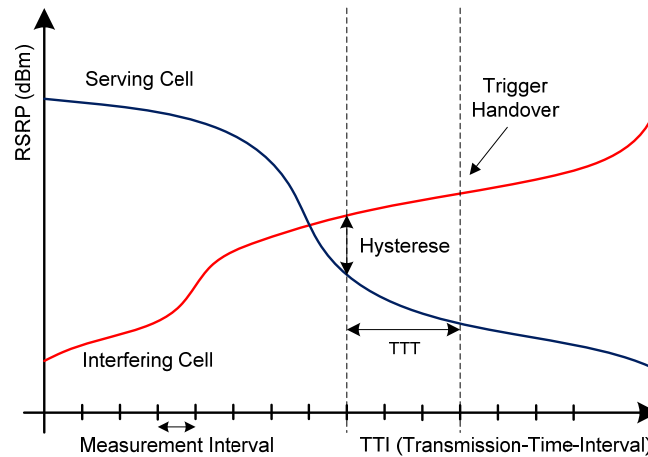



Figura 4.6 – 3GPP LTE Handover Procedure, [TS36300].

De referir que, cabe ao eNodeB/sector de serviço efectuar regularmente a actualização dos parâmetros de *handover* de cada um dos seus UEs. No caso particular deste trabalho, onde um algoritmo, a ser apresentado na secção seguinte, é responsavel por optimizar os parâmetros de *handover*, esta actualização fica dependente da actualização dos parâmetros de histerese e TTT pelo mesmo.

A cada ciclo de transmissão, cada eNodeB/sector verifica se existem relatórios de medidas de UE para processar. Sempre que um relatório de medidas é recebido, o eNodeB/sector verifica se a célula candidata oferece melhores condições de cobertura que a célula de serviço (HO decision). Se a célula candidata for melhor que a célula de serviço, no que diz respeito ao nível de RSRP medido, o processo de *handover* inicia-se.

Tomada a decisão de *handover*, a função ANR começa por verificar se o PCI da célula candidata consta na sua base de dados (NRT). Se o PCI da célula candidata já se encontrar na NRT, o processo de *handover* prossegue, caso contrário o eNodeB solicita ao UE o ECGI da célula candidata. O UE, por seu lado responde com o PCI, ECGI da célula candidata. Com base no ECGI da célula candidata, o eNodeB de origem troca informação com o eNodeB destino para que ambos possam conhecer as suas NRTs. Esta troca de informação permitirá verificar a existência de eventuais conflitos de PCI, os quais poderão ser solucionados usando o mecanismo descrito anteriormente. Uma vez trocada

a informação de NRT entre ambos os eNodeB, é dada a indicação ao UE para que este efectue o *handover* para a nova célula.

Uma vez recebido o comando de *handover*, o UE abandona a sua antiga célula de serviço, libertando os recursos associados. Durante este processo, este mantém uma medição constante do nível de sinal recebido. Se o nível de sinal recebido descer abaixo do limiar de sensibilidade do UE, o processo de *handover* falha e o UE regressa à célula de origem. Através do *Link-Budget* apresentado no Anexo C considera-se que cada UE tem uma sensibilidade de -133 dBm. Caso o nível de sinal recebido seja superior ao limiar mínimo de sensibilidade, o UE efectua o acesso à nova célula e mede a qualidade do sinal utilizando o SINR médio de todos os RBs como medida de qualidade do sinal recebido. Se o SINR médio for superior a um dado limiar, o *handover* é concluído, caso contrário o UE regressa à sua célula de origem. O SINR mínimo para que um UE possa aceder a uma célula é de -10 dB como proposto em [HoTo07] para um receptor com duas antenas e para um débito mínimo de 1 Mbps em *downlink*. A Figura 4.7 ilustra a sequência de mensagens que é trocada entre UE e eNodeB origem e destino durante o processo de *handover*, após o evento A3.

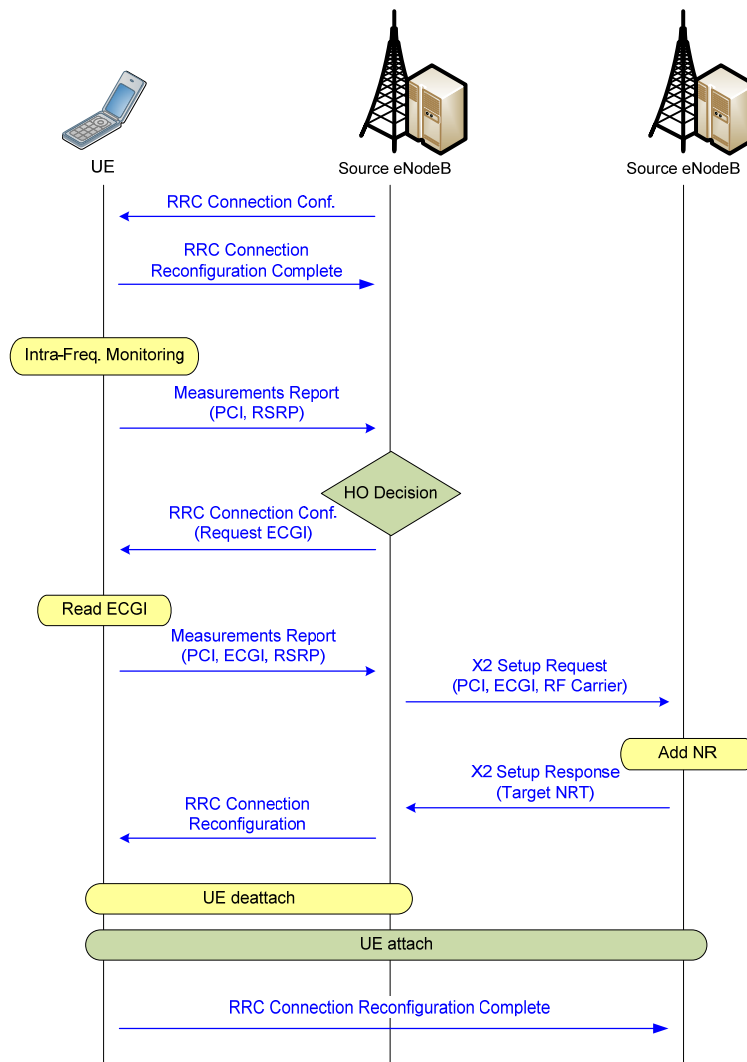



Figura 4.7 – Fluxo de mensagens trocado no algoritmo ANR proposto.

De referir que ao longo de todo o processo de *handover*, os KPIs de *handover* são actualizados ao nível da célula, permitindo posteriormente uma análise do número de *handovers* e taxa de sucesso dos mesmo ao longo de cada TTI.

É de destacar também o facto que a função ANR só permite a adição de no máximo 32 relações vizinhança e que periodicamente a lista de NR existentes em cada NRT é revista de modo a que, todas as NR que não são utilizadas dentro de um determinado período, serão removidas. Esta última acção garante que relações vizinhança que não são muito utilizadas não impeçam outras NRs mais importantes de ser adicionadas à NRT.

Para tornar a comunicação entre cada eNodeB e UE coerente, um algoritmo assegura que a comunicação entre estes segue o processo de *handover* intra-frequência

especificado pelo 3GPP e o qual já foi descrito no capítulo 3. A Figura 4.8 ilustra o fluxo de mensagens trocadas entre UE e eNodeB durante o processo de *handover*.

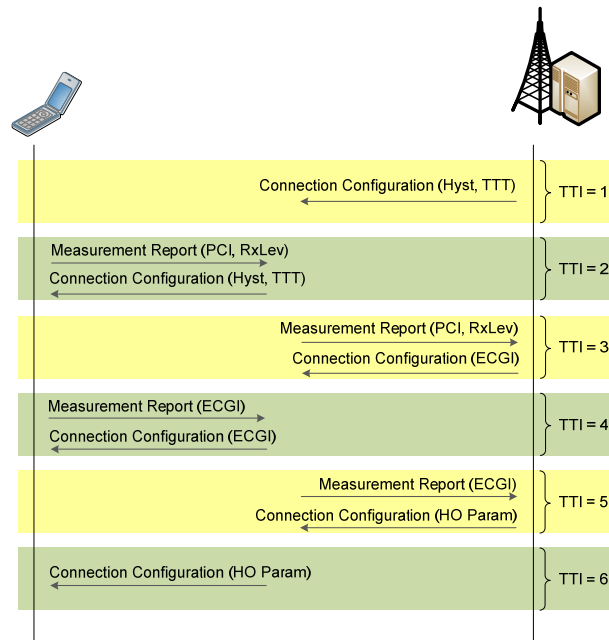



Figura 4.8 – Sinalização entre eNodeB e UE durante o processo de handover em cada TTI.

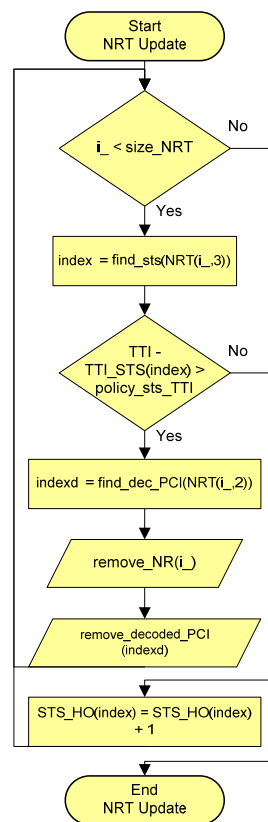



Figura 4.9 – Algoritmo de Actualização da NRT.

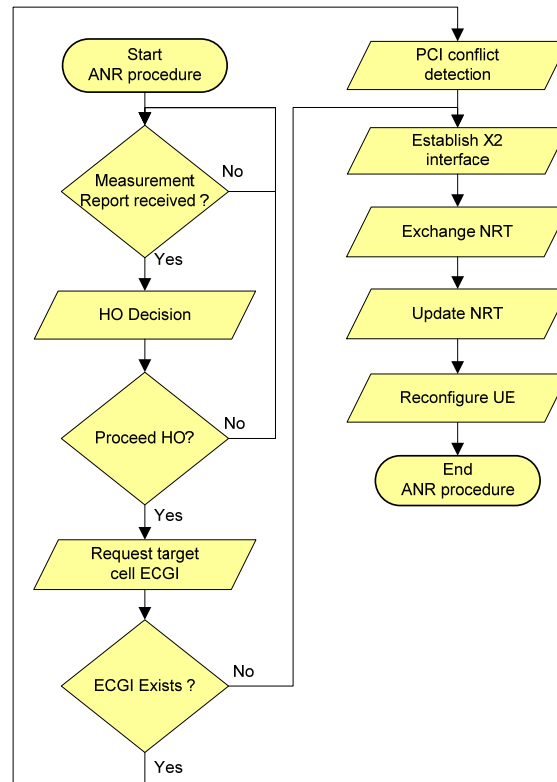



Figura 4.10 – Fluxograma do algoritmo ANR.

4.2.4 Optimização de Handover

Finalmente, a terceira funcionalidade implementada no contexto das SON é a optimização automática de parâmetros de *handover*, com vista à redução da taxa de *handovers* por oscilação, HPP. Localizada ao nível da célula, esta função visa uma actualização dinâmica dos parâmetros de *handover*, com base nas medidas efectuadas por cada UE que contribuem para o cálculo do HPI_{HPP}.

4.2.4.1 Detecção de Oscilação

De modo a detectar a ocorrência de um *handover* por oscilação, cada célula mantém um histórico de todos os utilizadores que foram alvo de *handover*. Sempre que é inicializado um *handover* de um dado UE, a célula de serviço que despoletou o seu início guarda o ID deste, que num caso prático poderá ser o *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI) ou *International Mobile Equipment Identity* (IMEI) do equipamento, e o TTI no qual o evento ocorreu. Sempre que uma célula recebe um novo utilizador por *handover*, o algoritmo apresentado na Figura 4.11 é aplicado. Nesta figura o número de *handovers* (NHO) é sempre incrementado quando um UE é recebido. Se o UE existe na lista de UE que foram recentemente alvo de *handover*, o algoritmo verifica quanto tempo passou

desde o seu último *handover*, ou seja, verifica o número de TTIs que passaram desde então. Se o número de TTIs que separa o primeiro *handover* do segundo for inferior a um determinado periodo crítico (T_{crit}), o número de *handovers* por oscilação é incrementado (N_{HOpp}).

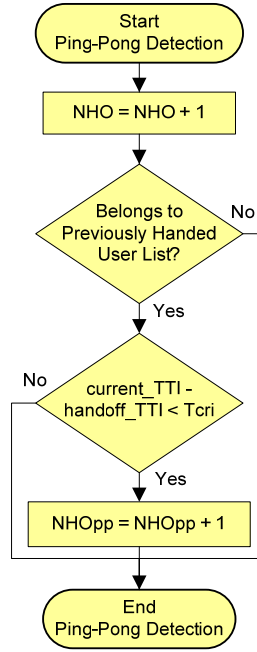



Figura 4.11 – Algoritmo de detecção de oscilação de handover.

4.2.4.2 Controlo de Oscilação

No algoritmo de *hard-handover*, o UE tem apenas de garantir que o RSRP da célula candidata é superior ao RSRP da sua célula de serviço, adicionado de uma determinada histerese. Ao fazer isto, o UE poderá cair numa situação onde o RSRP da célula de serviço oscila com uma dada frequência, cujo periodo é superior ao TTT mas não superior o suficiente para evitar a oscilação de *handover*. Esta situação indesejada poderá ser colmatada através do ajuste dinâmico do TTT com base no HPI_{HPP}. Contudo, o eNodeB não está desta forma a prevenir a ocorrência de *handover* mas sim a reagir à mesma. Assim, em vez de usar os valores instantâneos de RSRP da célula de serviço, cada UE calcula a média dos últimos *N* valores de RSRP registados na célula de serviço, tornando assim as decisões de *handover* mais fidedignas. O RSRP médio numa dada célula poderá ser calculado usando a seguinte expressão,

$$\mathrm{RSRP_{avg}} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \mathrm{RSRP(nT)}}{\mathrm{N}} \quad (4.4)$$

onde *N* representa o número total de *n* amostras durante um dado período *T*. Porque fenómenos como desvanecimento rápido do sinal podem ocorrer, o parâmetro *T* poderá ser ajustado para cada tipo de ambiente de propagação rádio.

No que diz respeito ao funcionamento do algoritmo de optimização propriamente dito, este parte do mesmo princípio descrito em [TIJI10], ou seja, no aumento ou diminuição periódicas dos valores de Histerese e TTT sempre que o HPI_{HPP} é maior ou menor, respectivamente, que um dado limiar estabelecido através das políticas do sistema. Contudo, o algoritmo desenvolvido vai mais longe, na medida em que tenta continuamente garantir os melhores valores de Histerese e TTT evitando ao mesmo tempo situações de suboptimização de parâmetros. Assim, se o HPI_{HPP} medido é superior ao limiar máximo estabelecido, atinge-se uma designada análise de mau desempenho, caso contrário atinge-se uma análise de bom desempenho.

A actualização dos parâmetros de *handover* é feita periodicamente usando um designado contador de bom e mau desempenho. Cada vez que um dado TTI é alcançado, os parâmetros de *handover* são revistos. Se o contador de mau desempenho atinge o TTI de má performance, o algoritmo começa por verificar se o HPI_{HPP} actual é igual ao último HPI_{HPP} registado, aquando da última análise de mau desempenho. Se diferentes, os valores de Histerese e TTT são incrementados, caso contrário, o algoritmo verifica se o NHO aumentou. Se sim, a Histerese e TTT são incrementados, se não, são decrementados.

Caso o HPI_{HPP} seja menor que o valor de HPI_{HPP} definido pelas políticas, é efectuada uma análise de bom desempenho. Se o contador de bom desempenho atinge o TTI de boa performance, definido também pelas políticas do sistema, os parâmetros de Histerese e TTT são decrementados. Numa análise de boa performance procura-se optimizar quanto possível os parâmetros de *handover*. A Figura 4.12 ilustra o fluxograma que descreve o funcionamento do algoritmo desenvolvido.

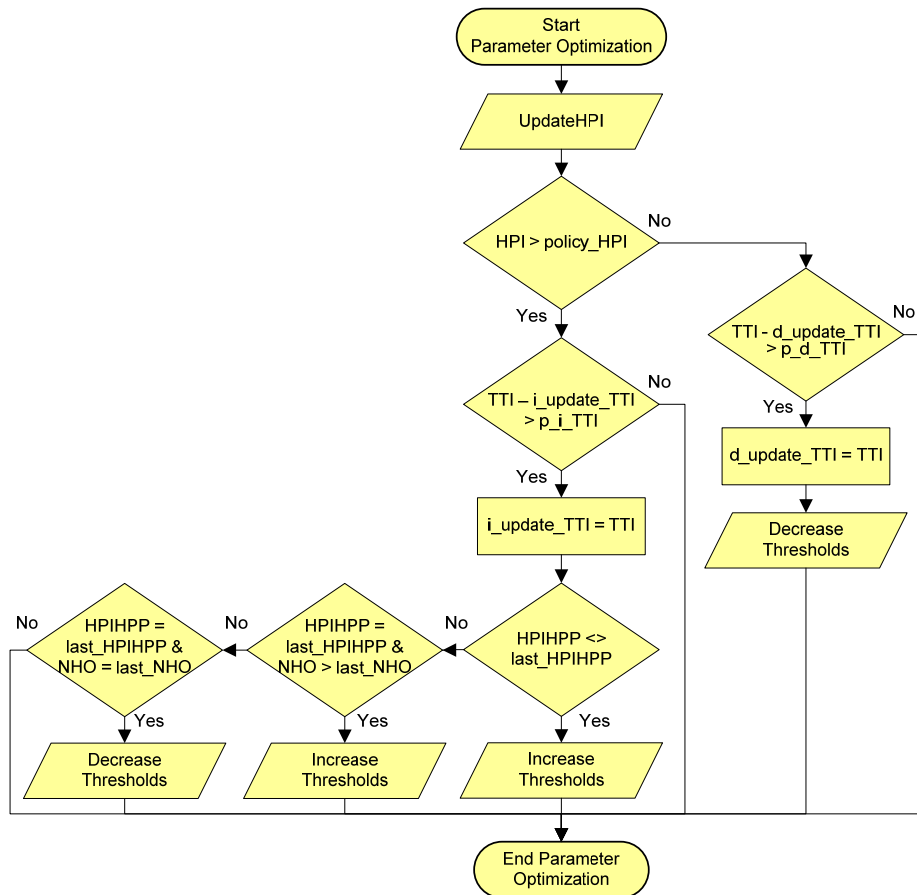



Figura 4.12 – Algoritmo de controlo de oscilação de handover.

Segundo [LGKi10], um UE que se desloque a uma velocidade elevada, tem uma menor taxa de *handover* quando comparado com um UE que se desloca a baixa velocidade. Esta situação deve-se em grande medida ao facto de um UE que se desloca a uma velocidade elevada, ser incentivado a passar para uma célula de uma camada superior na hierarquia, ou seja, passar para uma célula cujo raio de cobertura é superior, de forma a minimizar a sinalização e proporcionar uma melhor gestão dos recursos rádio. Por outro lado, um UE que se desloca a uma velocidade baixa sofre de uma maior flutuação no RSRP da sua célula de serviço, devido à proximidade com a periferia da célula, especialmente em zonas urbanas com elevada densidade de células. Na primeira situação, exige-se um valor de histerese baixo, ao passo que na segunda situação requere-se um valor de histerese mais elevado. Outra situação que poderá afectar o desempenho dos *handovers* diz respeito ao tipo de serviço onde tipicamente serviços do tipo *Real-Time* (RT) têm mais prioridade, uma vez que são mais sensíveis ao atraso, quando comparados com serviços do tipo *Non Real-Time* (NRT). Segundo [LGKi10], para o caso de serviços RT, deverá ser usado um valor de histerese baixo, ao passo que em serviços do tipo NRT deverá ser utilizado um valor de histerese elevado. Assim, para

ultrapassar os constrangimentos que a velocidade e tipo de serviço do UE poderão causar na performance de *handover*, ao valor de Histerese é subtraído um determinado parâmetro $delta$ calculado com base na velocidade do UE e no tipo de dados que este troca com o eNodeB. O parâmetro $delta$ é dado por,

$$delta_{(v,v_{max},s)} = \left(\frac{v}{v_{max}} + 1\right) + \left(-\frac{s}{6} + 1\right) \tag{4.5}$$

onde v é a velocidade do UE, v_{max} a velocidade máxima dos UEs que são servidos pela célula a cada TTI e s o tipo de dados que o UE troca com o eNodeB no plano do utilizador. No âmbito deste trabalho foram definidos seis tipos de tráfego: FTP, HTTP, Vídeo, VoIP, Gaming e *Full Buffer*. A cada tipo de tráfego corresponde um peso, o qual em determinada medida indica a sensibilidade do serviço a atrasos. Na Tabela 4.2 são ilustrados os serviços e os respectivos pesos que são tidos em conta.

Tabela 4.2 – Peso atribuído a cada tipo de tráfego realizado por um UE.

Tipo de Serviço	Peso
FTP	1
HTTP	2
Vídeo	3
VoIP	4
Gaming	5
Full Buffer	6

4.3 Interface Gráfica para Simulação de Redes Auto-Geridas

Para efectuar uma correcta avaliação do desempenho dos algoritmos anteriormente descritos torna-se necessário efectuar a simulação destes em diferentes cenários. Para alcançar este objectivo, tal como já referido, foram introduzidas alterações ao simulador que conferem a este a capacidade de definir e simular diferentes cenários, onde por exemplo, estações base e utilizadores têm características diferentes entre si. Estas alterações resumem-se à inclusão de novas funções e alteração de algumas já existentes, bem como a criação de uma interface gráfica que permite ao utilizador definir manualmente cada cenário. No caso particular das funções SON desenvolvidas, esta interface possibilita a sua parametrização. O Anexo B contém um manual para o simulador desenvolvido que possui todas as intruções necessárias para tirar o maior partido deste.

Em suma, as alterações efectuadas ao simulador garantem um maior nível de coerência e veracidade, aquando da comparação de dados obtidos por simulação com os extraídos de uma rede real, ou com o resultado de simulações obtidas com outros simuladores.

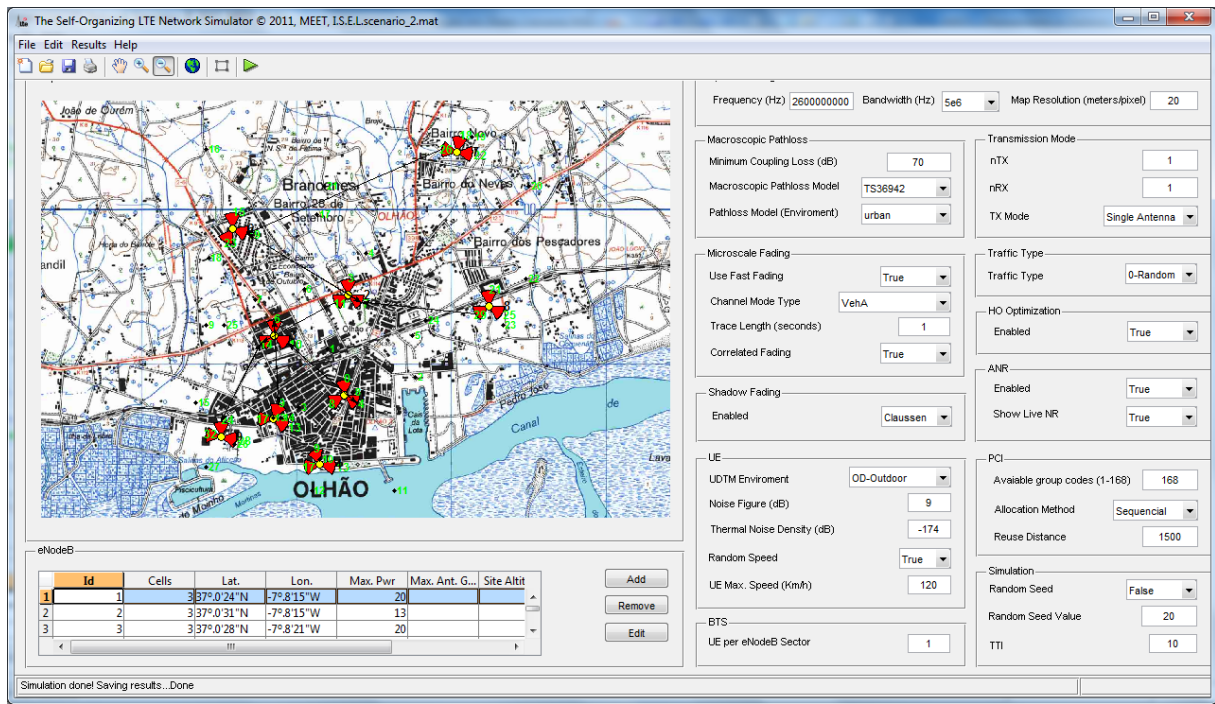



Figura 4.13 – Interface gráfica do simulador LTE.

As secções que se seguem descrevem os principais parâmetros que um utilizador poderá definir no âmbito dos algoritmos anteriormente descritos.

4.3.1 Atribuição e Resolução de PCI

No que diz respeito à atribuição de PCI, a interface gráfica possibilita ao utilizador especificar o método de atribuição (sequencial, distância mínima de reutilização), o número de grupos de PCI disponíveis para a atribuição e a serem usados por qualquer um dos métodos e a distância mínima de reutilização.

4.3.2 Automatic Neighbour Relation (ANR)

No que diz respeito ao algoritmo de ANR o utilizador poderá definir os seguintes parâmetros:

- *Serving cell measurement threshold* (dBm) – Valor de RSRP da célula de serviço abaixo do qual o UE começa a fazer medidas das células interferentes (por defeito igual a -100 dBm);

- *Event trigger offset* (dB) – *Offset* que compensa o valor de histerese (por defeito igual a 0 dB);
- *Max NR relation* – Número máximo de relações vizinhança que cada célula poderá ter na sua NRT (por defeito igual a 32);
- *UE minimal sensitivity* (dBm) – Sensibilidade máxima de um UE (através do *link-budget*, aproximadamente igual a -133 dBm);
- *UE minimal access SINR average* (dB) – Valor médio mínimo de SINR para que um UE possa aceder a uma célula (por defeito -10 dB como proposto por [HoTo07]).

4.3.3 Optimização de Handover

No que diz respeito aos parâmetros do algoritmo de optimização de *handover* passíveis de serem alterados pelo utilizador usando a interface, estes são:

- *Handover Hysteresis* (dBm) – Valor de histerese inicial a partir do qual o algoritmo de optimização irá iniciar a sua função (por defeito igual a 3 dB);
- *Max. Handover Hysteresis* (dB) – Valor máximo de histerese que poderá ser alcançado por optimização (por defeito igual a 6 dB);
- *Min. Handover Hysteresis* - Valor mínimo de histerese que poderá ser alcançado por optimização (por defeito igual a 2 dB);
- TTT – Valor de *Time-To-Trigger* inicial a partir do qual o algoritmo de optimização irá iniciar a sua função (por defeito igual a 3 TTIs);
- Max. TTT – Valor máximo de TTT que poderá ser alcançado por optimização (por defeito igual a 12 TTIs);
- Min. TTT - Valor mínimo de TTT que poderá ser alcançado por optimização (por defeito igual a 2 TTIs);
- *Critical* TTI – Período dentro do qual um *handover* de regresso à sua celula de origem é contabilizado como *handover* por oscilação (por defeito 15 TTIs).

Nota que, os parâmetros temporais foram normalizados de modo a minimizar o tempo de cada simulação e os recursos de HW necessários.

Capítulo 5

Análise de Desempenho

Neste capítulo, é feita uma análise de desempenho aos algoritmos expostos no capítulo 4 utilizando o simulador LTE desenvolvido. Com base num conjunto de cenários reais, com diferentes ambientes de propagação e com diferentes configurações, é realizado um conjunto de simulações que permitem analisar o funcionamento e desempenho de cada um dos algoritmos desenvolvidos em diferentes circunstâncias. Este capítulo começa com uma análise à cobertura obtida pelo simulador para cada um dos cenários, a qual é comparada com a obtida através da simulação dos mesmos, usando a ferramenta de planeamento e optimização celular Atoll®. Posteriomente é analisado o desempenho individual de cada uma das funções desenvolvidas, tendo como base, da mesma forma, os resultados obtidos através da simulação das mesmas utilizando a ferramenta Atoll®. No caso particular da função de optimização de *handover*, esta será avaliada tendo como base, um conjunto de dados estatísticos recolhidos de uma rede real GSM.

5.1 Ferramenta de Planeamento e Optimização Atoll

O Atoll® é um *software* escalável, multi-tecnologia, de desenho e optimização de redes RF. O Atoll® suporta um grande número de tecnologias, como por exemplo GSM, GPRS, CDMA, WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ou LTE. Através deste *software* é possível efectuar o planeamento de uma rede celular utilizando *software* integrado GIS (Geographic Information System), que permite a manipulação de informação geográfica, aplicação de modelos de propagação, simulação de cobertura e capacidade e funcionalidades que permitem o planeamento de frequências, códigos, relações vizinhança, etc. Para além das funcionalidades de planeamento, este *software* permite efectuar tarefas de optimização ao nível de frequências, relações vizinhança, *tilts*, etc. Em suma, as principais funcionalidade do Atoll® resumem-se a:

- Planeamento multi-tecnologia GSM/UMTS/CDMA2000/LTE;
- Optimização usando ferramentas de AFP (Automatic Frequency Planning) e ACP (Automatic Cell Planning);
- Utilização de macros e SDK (Software Development Kit) para customização;
- Sistema GIS (Geographic Information System) para manipulação de informação geográfica Multi-Formato/Multi-Resolução;
- Processamento distribuído.

Na Figura 5.1 pode ser observado um exemplo do ambiente de trabalho da ferramenta Atoll®.

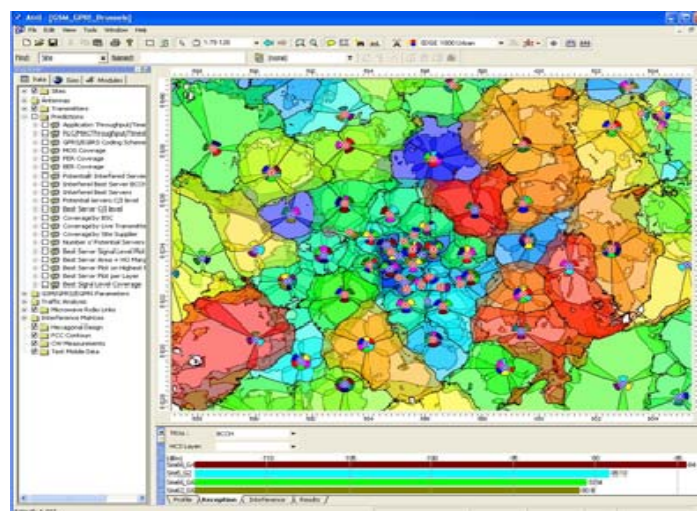



Figura 5.1 – Exemplo de um workspace LTE no Atoll®.

No âmbito deste trabalho, o Atoll® será utilizado para efectuar predições em cenários LTE de cobertura, atribuição de PCI e estimação de relações vizinhança.

5.2 Definição de Cenários

Para a avaliação do desempenho do simulador foram definidos quatro tipos de cenários os quais, em termos de propagação rádio, se podem definir como: Urbano Denso, Urbano, Suburbano e Rural. Cada um destes cenários é construído a partir de dados provenientes de uma rede real, os quais, foram gentilmente cedidos pela operadora móvel Vodafone Portugal. Esta opção foi tomada tendo em vista a aproximação dos resultados obtidos pelo simulador, com o que seria de esperar num cenário real de uma rede LTE. Devido à fase ainda prematura em que o LTE se encontra em Portugal, os dados recolhidos são provenientes da rede UMTS. Contudo, porque a maior parte das operadoras irá adoptar por soluções LTE co-localizadas, mantendo em alguns casos as configurações semelhantes às já usadas no UMTS (*tilt*, *azimuth*, altura das antenas, etc.), as simulações efectuadas nestas condições poderão constituir uma boa aproximação. Para a identificação de cada um destes cenários foram definidos critérios tais como, raio de célula ou morfologia do terreno, que tem como objectivo tornar a representação dos cenários o mais fidedigna possível, face às limitações inerentes ao simulador. Para auxiliar o processo de definição de cada um dos cenários, para cada um destes, foi calculado um *link-budget*, tomando como referência uma dada potência de transmissão. Os resultados obtidos poderão ser encontrados no Anexo C. A Tabela 5.1 resume o raio de célula estimado para cada um dos cenários, usando os modelos inicialmente implementados pelo simulador e para um SINR mínimo de acesso à célula de -10 dB, como sugerido por [HoTo09]. Os modelos de propagação usados foram o COST 231 (Extended Hata Model) [Rapp02], para o ambiente Urbano Denso, Urbano e Suburbano, e o modelo proposto em [TS36942] para o ambiente Rural.

Tabela 5.1 – Raio de célula médio por cenário.

Ambiente	Modelo de Propagação	Raio de Célula (m)
Denso Urbano	COST 231 (Urban Micro)	1512
Urbano	COST 231 (Urban Macro)	3439
Sub-Urbano	COST 231 (Suburban Macro)	4190
Rural	Rural [TS36942]	9180

Tal como já foi referido, o simulador desenvolvido contabiliza a altitude de cada BTS incluindo-a, sempre que aplicável, no cálculo da atenuação de propagação. Contudo, para evitar situações onde a altura dos edifícios é pouco homogénea ou o terreno irregular, foram escolhidas localizações cujas características minimizam as situações anteriores e daí, tornam a representação de cada cenário no simulador, mais fidedigna. Assim, para o cenário Urbano Denso optou-se pela zona urbana de Lisboa, mais concretamente pela zona metropolitana situada na Freguesia de Nossa Senhora de Fátima. Para o cenário Urbano optou-se pela cidade de Olhão. Para o cenário Suburbano optou-se pela Freguesia de Fernão Ferro, Seixal. Finalmente, para o cenário Rural optou-se pelo Município de Ferreira do Alentejo, Beja.

Por questões de simplificação, as perdas relativas a cabos são desprezadas, seguindo o princípio da mínima atenuação entre a BTS e o UE sugerido por [TS36942] e já apresentado no capítulo anterior, o qual é adoptado pelo TU-WIEN na versão original do simulador LTE. O valor de *tilt* eléctrico e mecânico de cada estação tem como base o utilizado pela rede real, sendo este tido em consideração no cálculo do diagrama de radiação das antenas pelo simulador. Todas as BTS estão equipadas com antenas *single-band* do fabricante Kathrein®, modelo K80010681.

No que diz respeito ao posicionamento dos UEs, este é feito de uma forma aleatória não havendo restrições à sua localização. A cada simulação só poderá ser definido um dos seguintes ambientes para os UEs: *Deep Indoor*, *Indoor*, *In-Car* e *Outdoor*. A cada BTS são atribuídos no máximo 10 utilizadores por sector devido aos elevados recursos computacionais necessários.

As secções que se seguem descrevem a parametrização geral adoptada para cada cenário. Toda a parametrização específica de cada simulação é descrita aquando da realização das mesmas, nomeadamente, no que diz respeito às funcionalidades SON implementadas.

5.2.1 Cenário Urbano Denso

Este cenário é composto por nove BTSs, na sua maioria tri-sectorizadas localizadas na Av. da República e zonas circundantes. Trata-se de uma zona com elevada densidade de utilizadores, pedestres e veiculares, num ambiente de propagação urbano onde as ruas têm aproximadamente a mesma largura e muitas delas com alguma vegetação. A Figura 5.2 ilustra a localização definida para cada uma das BTSs que compõem este cenário.

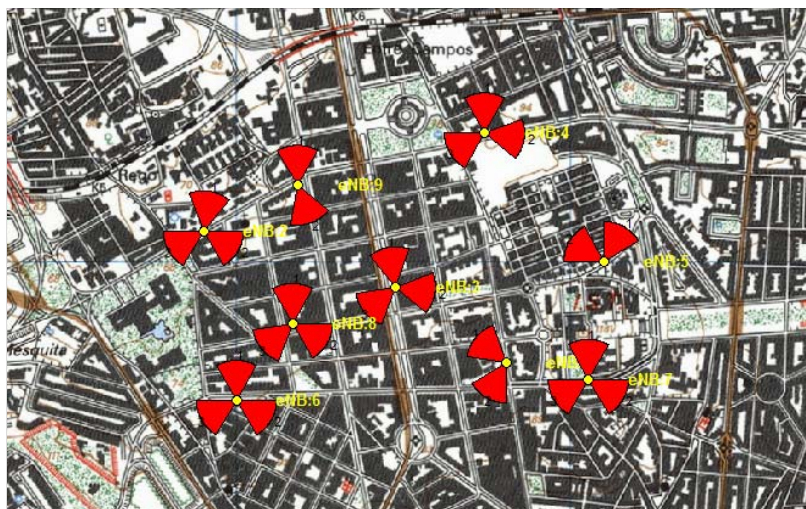



Figura 5.2 – Cenário de referência para ambiente de propagação Urbano Denso.

Considera-se neste cenário que, todas as BTSs estão localizadas no topo ou nas fachadas dos edifícios e que todas elas utilizam o mesmo tipo de antena. Considera-se também, inicialmente, que cada sector tem 10 utilizadores atribuídos. A Tabela 5.2 resume os parâmetros gerais tidos em conta em cada simulação efectuada com cenário Urbano Denso.

Tabela 5.2 – Parâmetros gerais de simulação para o cenário Urbano Denso.

Parâmetro	Valor
Ambiente	Urbano-Denso
Frequência	2,6 GHz
Largura de banda	5 MHz
Desvanecimento em larga escala	COST231 (TR 25.996)
Shadow Fading	Log-normal, μ=0; σ=10 (dB)
Perdas mínimas entre BTS e UE	70 dB (TS 36.942)
Nº de estações base	9 (24 sectores)
Raio de célula estimado	1512 m
Número utilizadores	240; Aprox. 54 Util./Km^2
Disposição dos utilizadores	Aleatória
Potência máxima da BTS	43 dBm (aproximadamente)
Ganho máximo da antena	16,7 dBi (K80010681)
Modo de Transmissão	SISO (TS 36.213-820)

5.2.2 Cenário Urbano

Este cenário é composto por nove BTSs tri-sectorizadas dispersas pela zona urbana da cidade de Olhão. Trata-se de um cenário com uma elevada densidade de utilizadores

pedestres e veiculares, num ambiente de propagação caracterizado por edificios com diferentes alturas e tamanhos, bem como por ruas pouco uniformes. A razão que levou à escolha desta localização para o cenário Urbano deveu-se essencialmente à morfologia aproximadamente uniforme do terreno. Neste cenário, considera-se que as BTSs poderão estar no topo ou nas fachadas dos edifícios ou mesmo em torres nas zonas mais afastadas da zona urbana. À semelhança do cenário Urbano Denso, a cada sector será atribuído inicialmente 10 utilizadores. A Figura 5.3 ilustra a localização de cada uma das estações que compõem este cenário.

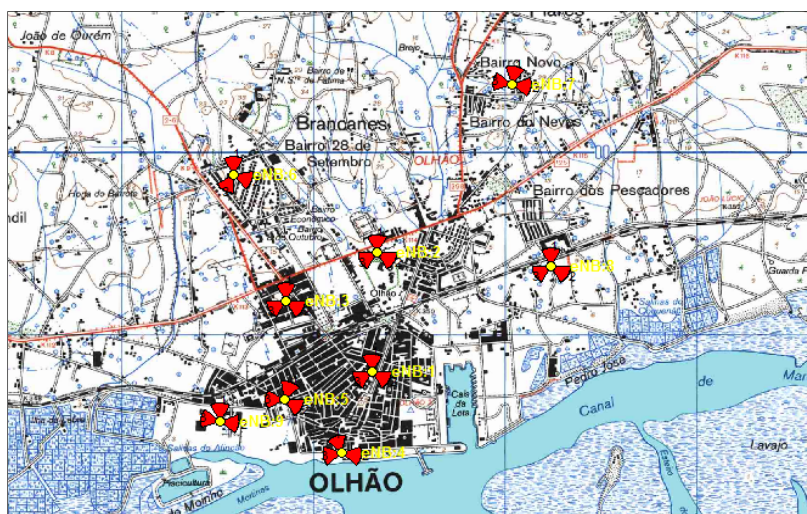



Figura 5.3 – Cenário de referência para ambiente de propagação Urbano.

A Tabela 5.2 resume os parâmetros gerais tidos em conta em cada simulação efectuada no cenário Urbano.

Tabela 5.3 – Parâmetros gerais de simulação para o cenário Urbano.

Parâmetro	Valor
Ambiente	Urbano
Frequência	2,6 GHz
Largura de banda	5 MHz
Desvanecimento em larga escala	COST 231(Urban Macro)
Shadow Fading	Log-normal, μ=0; σ=10 (dB)
Perdas mínimas entre BTS e UE	70 dB (TS 36.942)
Nº de estações base	9 (27 sectores)
Raio de célula estimado	3439 m
Número utilizadores	270; Aprox. 19 Util./Km^2
Disposição dos utilizadores	Aleatória
Potência máxima da BTS	43 dBm (aproximadamente)
Ganho máximo da antena	16,7 dBi (K80010681)
Modo de Transmissão	SISO (TS 36.213-820)

5.2.3 Cenário Suburbano

Este cenário é composto por dez BTSs na sua maioria tri-sectorizadas dispersas pela localidade de Fernão Ferro, Seixal. Trata-se de um cenário com elevada densidade de utilizadores veiculares, pelo facto de ser cruzado por uma auto-estrada. Contudo, por limitações do próprio simulador, não é possível representar de forma distinta os utilizadores que se deslocam na auto-estrada a uma velocidade superior aos demais. Tal como no cenário anterior, cada sector tem, inicialmente, 10 utilizadores atribuídos. A Figura 5.4 ilustra a localização de cada uma das BTSs.

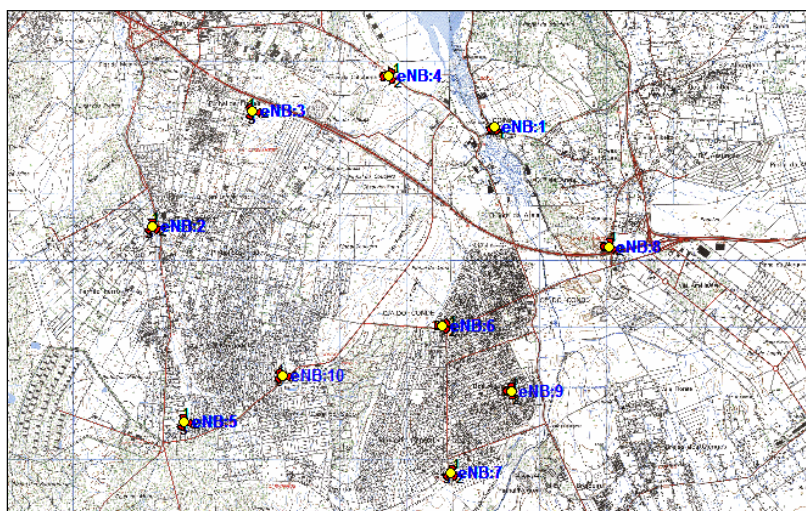



Figura 5.4 – Cenário de Referência para ambiente de propagação Suburbano.

A Tabela 5.4 resume os parâmetros gerais tidos em conta em cada simulação efectuada no cenário Suburbano.

Tabela 5.4 – Parâmetros gerais de simulação para o cenário Suburbano.

Parâmetro	Valor
Ambiente	Suburbano
Frequência	2,6 GHz
Largura de banda	5 MHz
Desvanecimento em larga escala	COST231 (TR 25.996)
Shadow Fading	Log-normal, μ=0; σ=10 (dB)
Perdas mínimas entre BTS e UE	70 dB (TS 36.942)
Nº de estações base	10 (29 sectores)
Raio de célula estimado	4190 m
Número utilizadores	290; Aprox. 5 Util./Km^2
Disposição dos utilizadores	Aleatória
Potência máxima da BTS	43 dBm (aproximadamente)
Ganho máximo da antena	16,7 dBi (K80010681)
Modo de Transmissão	SISO (TS 36.213-820)

5.2.4 Cenário Rural

Este cenário é composto por quatro BTSs dispersas pelo município de Ferreira do Alentejo. Trata-se de um cenário rural com baixa densidade de utilizadores, num ambiente de propagação em espaço aberto, onde as estações se encontram separadas de alguns quilómetros entre si. Cada sector tem no máximo 10 utilizadores e existem no total 10 sectores.

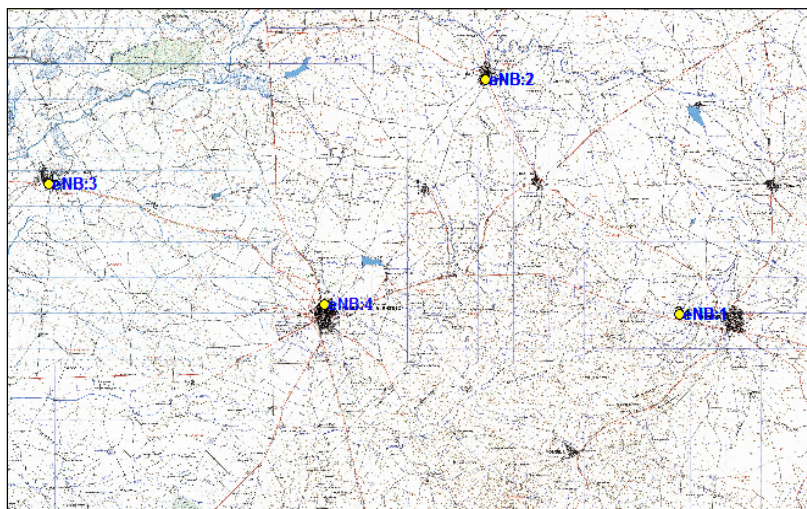



Figura 5.5 – Cenário de referência para ambiente de propagação Rural.

Neste cenário todas as BTSs são compostas por uma torre, cuja altura ronda em média os 30 m. A Tabela 5.5 ilustra os parâmetros gerais tidos em consideração durante cada simulação.

Tabela 5.5 – Parâmetros gerais de simulação para o cenário Rural.

Parâmetro	Valor
Ambiente	Rural
Frequência	2,6 GHz
Largura de banda	5 MHz
Desvanecimento em larga escala	Rural [TS36942]
Shadow Fading	Log-normal, μ=0; σ=10 (dB)
Perdas mínimas entre BTS e UE	70 dB (TS 36.942)
Nº de estações base	4 (10 sectores)
Raio de célula estimado	9180 m
Número utilizadores	100; Aprox. 0.3 Util./Km^2
Disposição dos utilizadores	Aleatória
Potência máxima da BTS	43 dBm (aproximadamente)
Ganho máximo da antena	16,7 dBi (K80010681)
Modo de Transmissão	SISO (TS 36.213-820)

5.3 Simulação

Após a definição de cada cenário, procede-se ao início das simulações. Para esta fase foram definidos dois grupos de simulação. O primeiro grupo de simulações visa avaliar o desempenho do simulador implementado sem nenhuma funcionalidade de auto-gestão activa. Esta primeira fase pretende analisar os níveis de cobertura que são propostos pelo simulador implementado e compará-los com os obtidos através da ferramenta Atoll®. Quanto ao segundo grupo de simulações, este tem como objectivo avaliar individualmente o desempenho das funções SON de atribuição e resolução de PCI, ANR e optimização de *handover*.

5.3.1 Análise de Cobertura

Antes de proceder à análise do desempenho das funções SON implementadas, procedeu-se a uma análise de cobertura, realizada pelo simulador para cada um dos cenários anteriormente descritos. Assim, para cada cenário define-se uma ROI, e para cada ROI analisa-se a distribuição de sectores e o nível de sinal recebido (RSRP). A Figura 5.6 ilustra a atribuição de sectores com base na matriz de perdas calculada para cada um dos cenários.

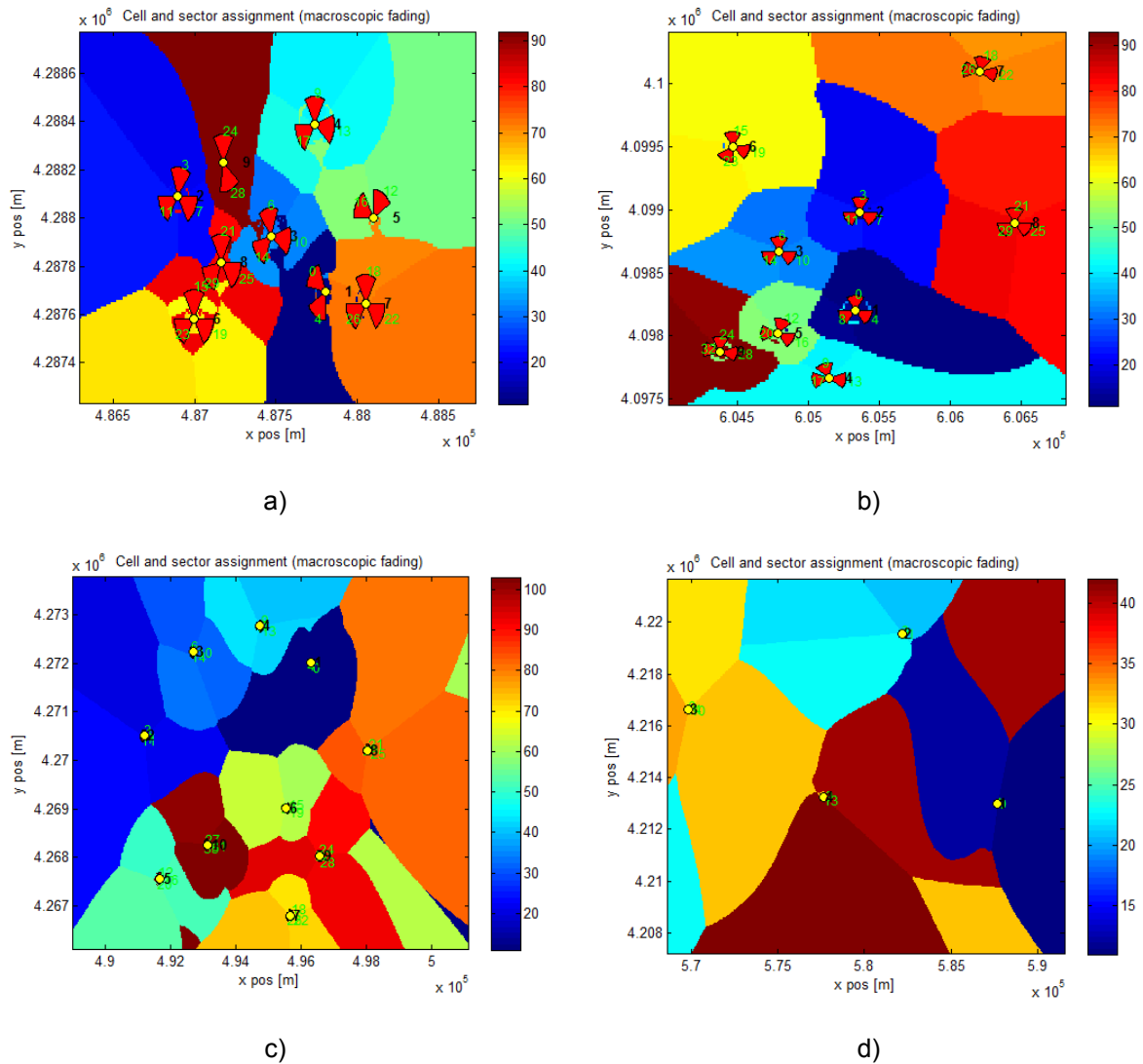



Figura 5.6 – Distribuição de sectores na ROI; a) Cenário Urbano Denso; b) Cenário Urbano; c) Cenário Suburbano; d) Cenário Rural.

Através da Figura 5.6 é possível observar qual o sector que será atribuído para um UE numa dada localização dentro da região de interesse. Como seria de esperar, existe uma boa definição da região correspondente a cada um dos sectores de cada uma das BTSs. De notar que algumas áreas são mais pequenas que outras, o que é expectável devido ao facto de existirem sectores com diferentes valores de *tilt* eléctrico e mecânico.

A Figura 5.7 ilustra o nível de sinal que é medido em cada ponto da região de interesse, em cada um dos cenários.

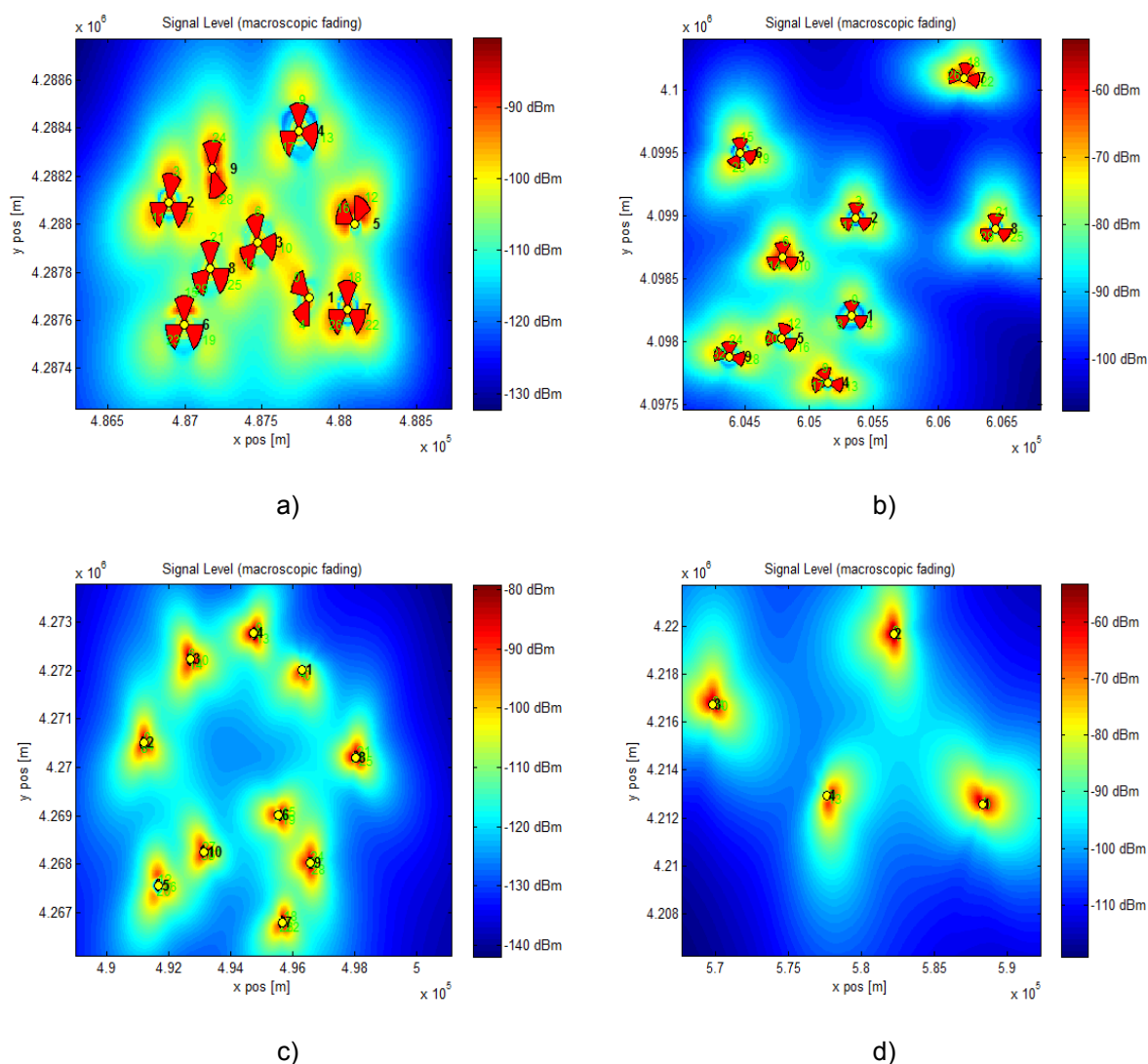



Figura 5.7 – Nível de sinal recebido estimado usando o simulador LTE; a) Cenário Urbano Denso; b) Cenário Urbano; c) Cenário Suburbano; d) Cenário Rural.

Através desta ilustração é visível a maior intensidade de sinal junto das estações base, nomeadamente na direcção de cada um dos sectores. À semelhança da distribuição de sectores, os diferentes valores de *tilt* eléctrico e mecânico traduzem-se numa maior ou menor área para um dado nível de sinal. Verifica-se também que os níveis de RSRP estão ligeiramente baixos, o que poderá ser causado pelo parâmetro de perdas mínimas entre a BTS e o UE.

Recorrendo à ferramenta de planeamento Atoll®, efectuou-se o mesmo tipo de simulações para cada tipo de cenário para comparar os resultados obtidos. Na Figura 5.8 podemos observar a atribuição de sectores para cada tipo de cenário.

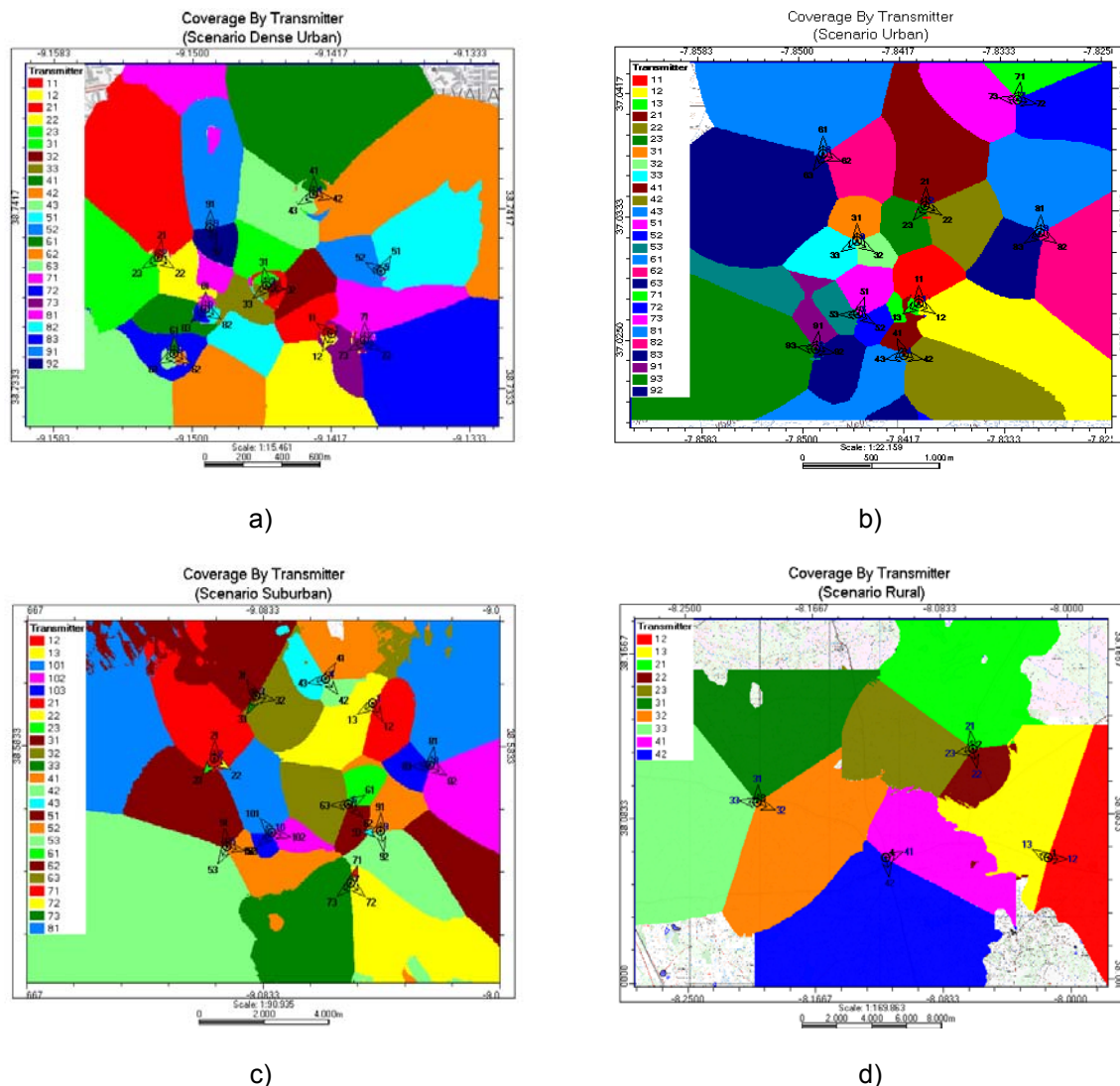



Figura 5.8 – Distribuição de sectores na ROI usando o Atoll®; a) Cenário Urbano Denso; b) Cenário Urbano; c) Cenário Suburbano; d) Cenário Rural.

Tomando como referência a Figura 5.6 podemos verificar que a distribuição efectuada pelo Atoll® se assemelha bastante à estimada pelo simulador. Contudo, nos resultados estimados pelo simulador, nomeadamente no cenário Urbano Denso, verifica-se alguma confusão nas cores utilizadas, o que dificulta a distinção dos sinais provenientes de diferentes sectores. Verifica-se também, nos resultados das simulações efectuadas pelo Atoll®, a ocorrência de situações onde a área de cobertura de uma célula é afectada pelo sinal de uma outra, situação essa que não se regista nos resultados obtidos pelo simulador. Esta situação deve-se essencialmente à aplicação de alguma abstracção na geração da matriz de atenuação, de modo a reduzir os recursos computacionais necessários. Esta última situação é claramente visível nos resultados obtidos para o cenário Suburbano (Figura 5.8 c)) onde existem áreas de cobertura de células que são

afectadas pelos sinais provenientes de células adjacentes. Apesar do rigor dos resultados obtidos pela ferramenta Atoll®, os resultados do simulador não deixam de ser bastante aceitáveis, permitindo visualizar com clareza, na maioria dos cenários, qual a área de cobertura de cada célula.

A Figura 5.9 ilustra o nível de sinal recebido em cada ponto da região de interesse, resultante da contribuição dos sinais emitidos por cada um dos sectores.

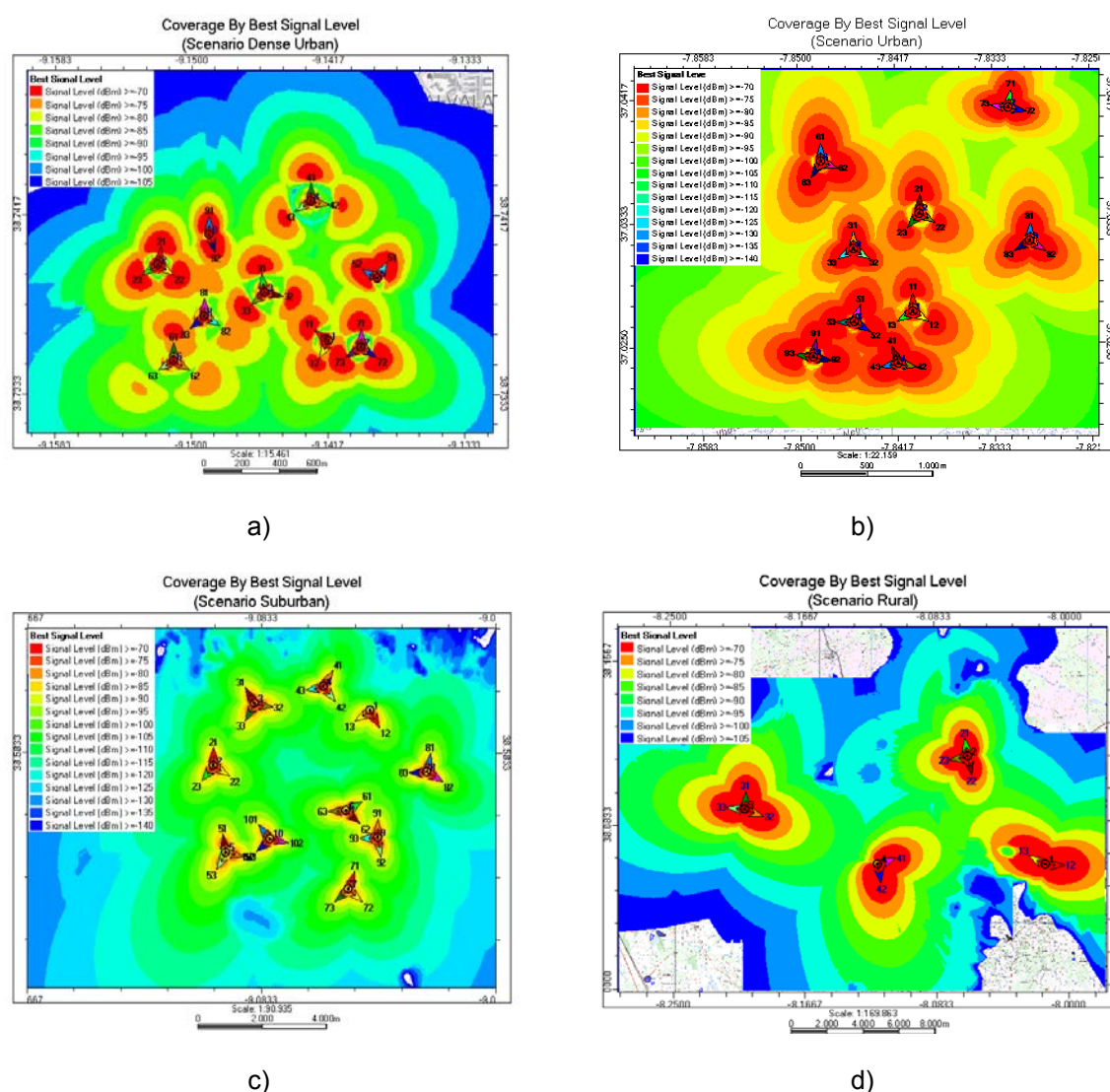



Figura 5.9 – Nível de sinal recebido estimado usando o Atoll®; a) Cenário Urbano Denso; b) Cenário Urbano; c) Cenário Suburbano; d) Cenário Rural.

Tomando como referência a Figura 5.7 pode-se verificar que o nível de sinal estimado pelo Atoll® é bastante idêntico ao estimado pelo simulador, não sendo a diferença maior que 5 dB na generalidade dos cenários. Esta diferença deve-se essencialmente ao facto do simulador possibilitar um maior nível de detalhe no cálculo da atenuação de

propagação, nomeadamente, através da introdução do desvanecimento log-normal e atenuação provocada pelo ambiente de propagação onde o UE se encontra. O resultado desta situação é particularmente visível nos cenários Urbano Denso (Figura 5.7 a)) e Urbano (Figura 5.7 b)) onde, por opção, o detalhe do cálculo da atenuação configurado é maior, o que resulta num nível de sinal substancialmente inferior quando comparado com os resultados obtidos pelo Atoll®.

Verifica-se igualmente que nos resultados obtidos pela ferramenta Atoll® existe uma quantificação do sinal recebido, ao passo que no simulador o decaimento do sinal é mais suave. Esta situação deve-se à resolução do cálculo do nível de sinal recebido configurada na ferramenta Atoll®. Ao diminuir a resolução diminui-se o tempo de simulação, contudo, diminuem-se os níveis de quantificação do sinal.

5.3.2 Análise das Funções SON

Na secção anterior foram comparados os níveis de cobertura obtidos através do simulador desenvolvido, com os obtidos pela ferramenta Atoll®, para cada um dos cenários definidos no início deste capítulo. Nesta secção analisa-se o desempenho de cada uma das funções SON descritas no capítulo 4.

Ao longo desta secção tentar-se-á, sempre que possível, comparar os resultados obtidos pelo simulador com os obtidos pela ferramenta de planeamento Atoll®, nomeadamente na análise das funções de alocação de PCI e ANR. Já na análise da optimização de *handover*, recorre-se a um conjunto de dados estatísticos disponibilizados pela operadora móvel Vodafone Portugal para este estudo, e que permitem comparar as taxas de oscilação de *handover* em determinados cenários, tomando como referência as registadas pela rede GSM da operadora.

5.3.2.1 Atribuição e Resolução de PCI

No que diz respeito à atribuição de PCI, tal como já foi referido no capítulo 4, esta poderá ser feita de uma forma sequencial ou através do método da mínima distância de reutilização, sendo este último bastante comum entre os simuladores de redes móveis celulares existentes no mercado. A Figura 5.10 ilustra um exemplo de uma alocação de PCI realizada pelo Atoll®, usando o método de distância mínima de reutilização.

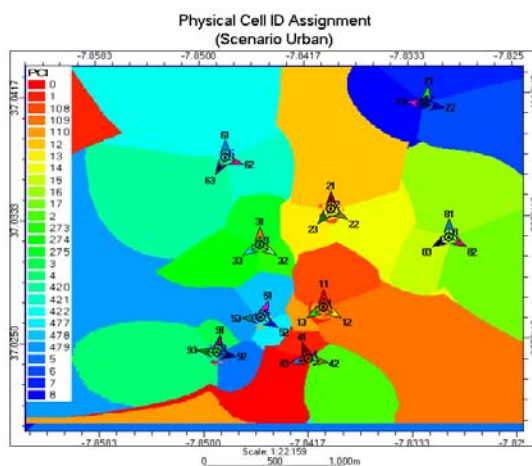



Figura 5.10 – Exemplo para uma alocação de PCI usando uma distância mínima de reutilização de 1500 m.

Como já foi referido no capítulo anterior, o método sequencial é um método simples e directo de atribuição, cujo único critério é atribuir o mesmo *Physical Cell Identity Group* a um eNodeB. Este método básico de atribuição de PCI levanta sérios problemas quando a lista de PCI disponíveis para um dado *cluster* é muito reduzida. Ao limitar o número de PCI usando o método sequencial, podemos observar a principal desvantagem deste pelo facto de surgirem sectores, próximos entre si, cujo PCI é idêntico e que dessa forma se interferem entre si. A Figura 5.11 ilustra um exemplo de uma atribuição usando o método sequencial com 168 e 4 *Physical Cell Identity Groups* disponíveis, dos 9 necessários para o cenário Urbano.

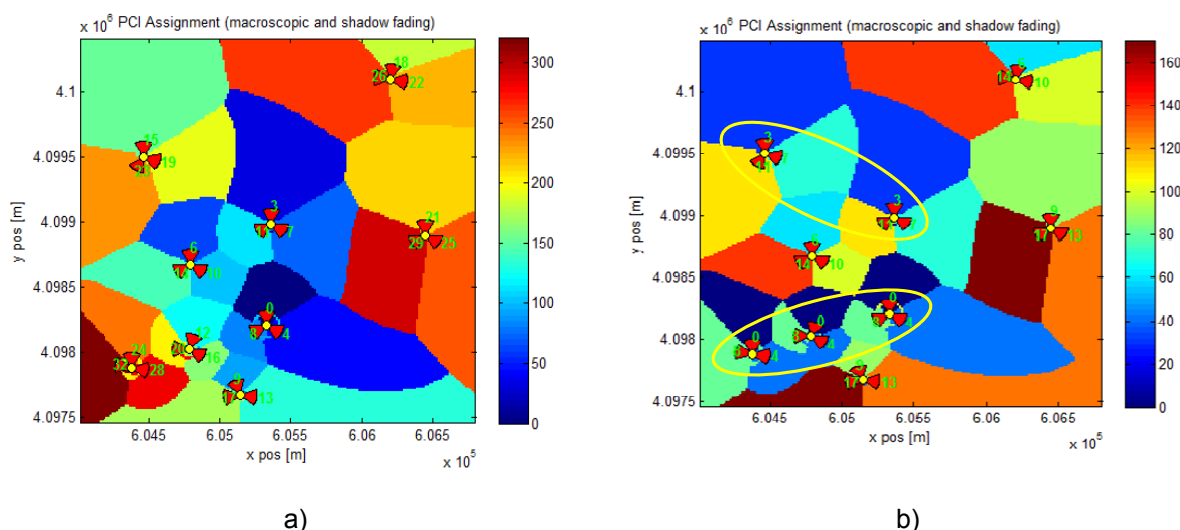



Figura 5.11 – Atribuição automática de PCI usando o método sequencial; a) Usando 168 PCI disponíveis; b) Usando 4 PCI disponíveis.

Como se pode observar, utilizando o método sequencial, quando o número de grupos de PCI é reduzido apenas a 4, (Figura 5.11 b)), surgem PCI próximos uns dos outros, como por exemplo os conjuntos 0, 4 e 8 e 3, 7 e 11 assinalados. Contudo, através do método de atribuição baseado na distância mínima de reutilização, esta situação é consideravelmente minimizada. A Figura 5.12 ilustra os resultados obtidos com o algoritmo da distância mínima de reutilização para os cenários com 168 e 4 *Physical Cell Identity Group* disponíveis e uma distância mínima de reutilização de 1000 m.

a) b)

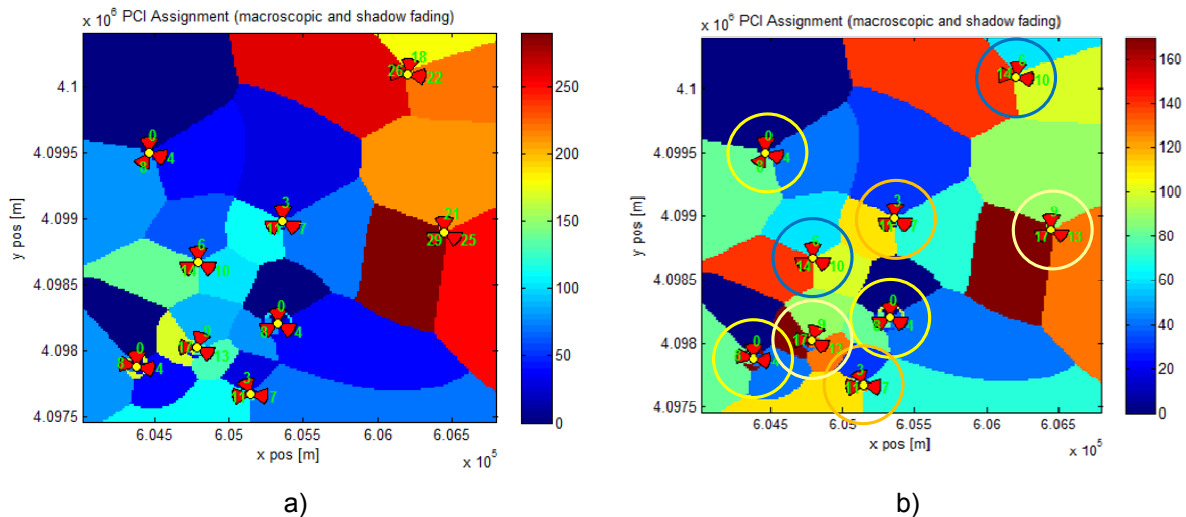



Figura 5.12 – Atribuição automática de PCI usando o método da mínima distância de reutilização (1000 m); a) Usando 168 grupos de PCI disponíveis; b) Usando 4 grupos PCI disponíveis.

Como se pode observar pela Figura 5.12 b), utilizando o método da distância mínima de reutilização, deixam de ocorrer situações de eNodeB/sector com os mesmos PCI próximos uns dos outros.

Para verificar a influência da distância de reutilização neste cenário aumentou-se a mesma para observar o desempenho do algoritmo. A Figura 5.13 ilustra o resultado obtido para uma distância de reutilização de 1500 e 2000 m.

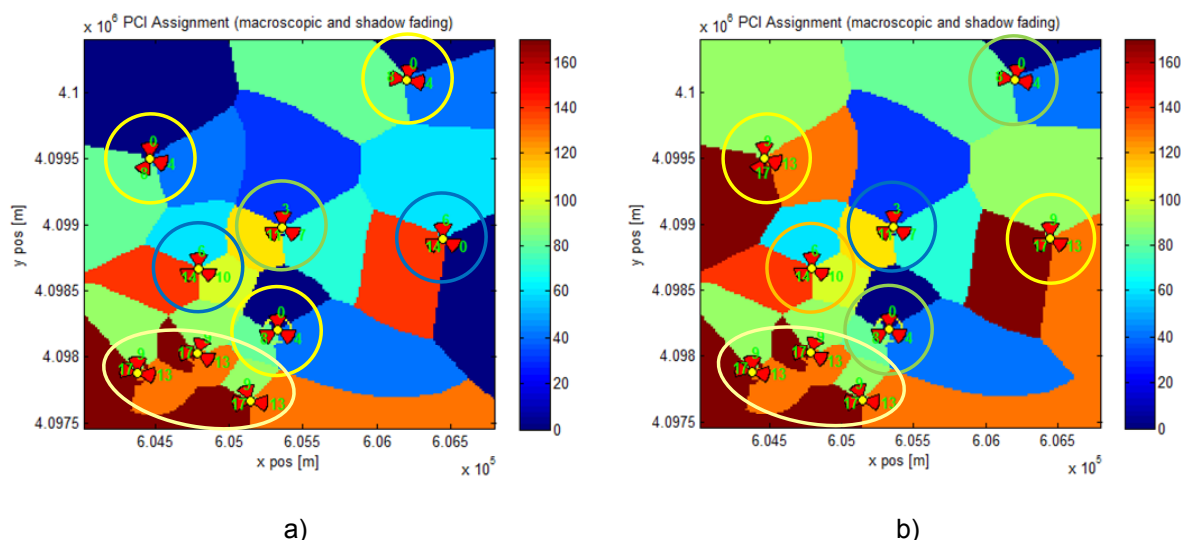



Figura 5.13 – Atribuição automática de PCI usando o método da mínima distância de reutilização com 4 grupos de PCI; a) Distância de reutilização = 1500 m; b) Distância de reutilização = 2000 m.

Como se pode observar, para as distâncias de reutilização de 1500 e 2000 metros o algoritmo revela alguma dificuldade em separar os eNodeB/sector com o mesmo PCI, colocando alguns próximos uns dos outros como é o caso do conjunto 9, 13 e 17 (Figura 5.13 b)).

No que diz respeito à função de resolução de conflito de PCI, como já foi referido no capítulo 4, esta visa a detecção de conflitos de PCI e a sua resolução aquando da activação de um novo eNodeB. Para poder simular a criação de um conflito de PCI ao eNodeB novo, é atribuído o mesmo *Physical Cell Identity Group* de um eNodeB já existente. Esta situação irá provocar um conflicto entre os PCIs utilizados pelas células do novo eNodeB e as células de um eNodeB já ao serviço. Deste conflito, pelas razões já apresentadas no capítulo 4, resultam UEs bloqueados devido à confusão que a difusão do mesmo PCI por células diferentes provoca na interpretação dos sinais de sincronismo. Será o número de UEs bloqueados que servirá de métrica para determinar a estabilidade da rede. Assim, quando deixam de existir UEs bloqueados, considera-se que a rede atingiu uma situação de estabilidade e portanto o novo eNodeB já não está a degradar o desempenho da rede. Para testar esta funcionalidade, recorre-se mais uma vez ao cenário Urbano. A Tabela 5.6 ilustra os parâmetros de simulação tidos em conta, para além dos já referidos no inicio deste capítulo.

Tabela 5.6 – Resolução de PCI – Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Modo de Canal	VehA
Ambiente	Outdoor
Nº de UE	{270;540}
Velocidade do UE	Aleatória, (até 120 Km/h)
Duração	500 TTI

Assim, utilizando o mesmo cenário Urbano provocou-se um conflito de PCI entre eNodeB 4 e 5, e analisou-se o número de TTIs necessários para o algoritmo resolver o conflito existente, com base nos relatórios de medidas enviados por cada UE aquando do processo de *handover*. A Figura 5.14 ilustra o número e a percentagem de UEs bloqueados, em função do TTI, para os cenários em que temos 10 e 20 utilizadores por sector.

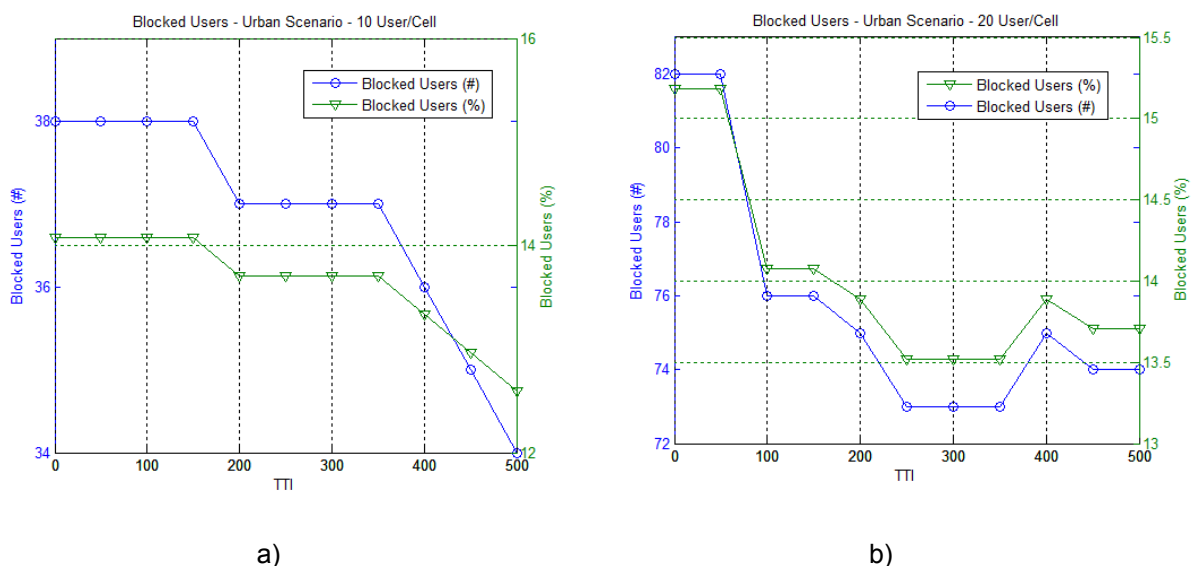



Figura 5.14 – Número de UEs Bloqueados e Número de Handovers; a) 10 UE/sector; b) 20 UE/Sector.

Ao contrário do que seria de esperar, ao final de 500 TTI ainda existem utilizadores bloqueados por interferência. No cenário onde temos 10 utilizadores/célula, consegue-se apenas uma redução de 4 UEs na lista de UEs bloqueados, o que corresponde, como se pode observar na Figura 5.14 a), a uma redução de apenas 3%. Já no cenário onde temos 20 utilizadores/célula podemos observar (Figura 5.14 b)) uma redução de 8 UEs na lista de UEs bloqueados, o que corresponde aproximadamente a uma redução de 1,75 %. Uma vez que no cenário com 20 utilizadores/célula existe uma maior densidade de

utilizadores, é normal que a resolução de pelo menos um conflito de PCI entre duas células resulte numa redução mais significativa do número de UEs bloqueados. Na Figura 5.15 podem ser observados os cenários finais, após a simulação dos cenários com 10 e 20 utilizadores/célula. Analisando as imagens podemos verificar que em ambos os cenários continuam a existir células de eNodeBs, cujos PCI podem provocar interferência em outras células.

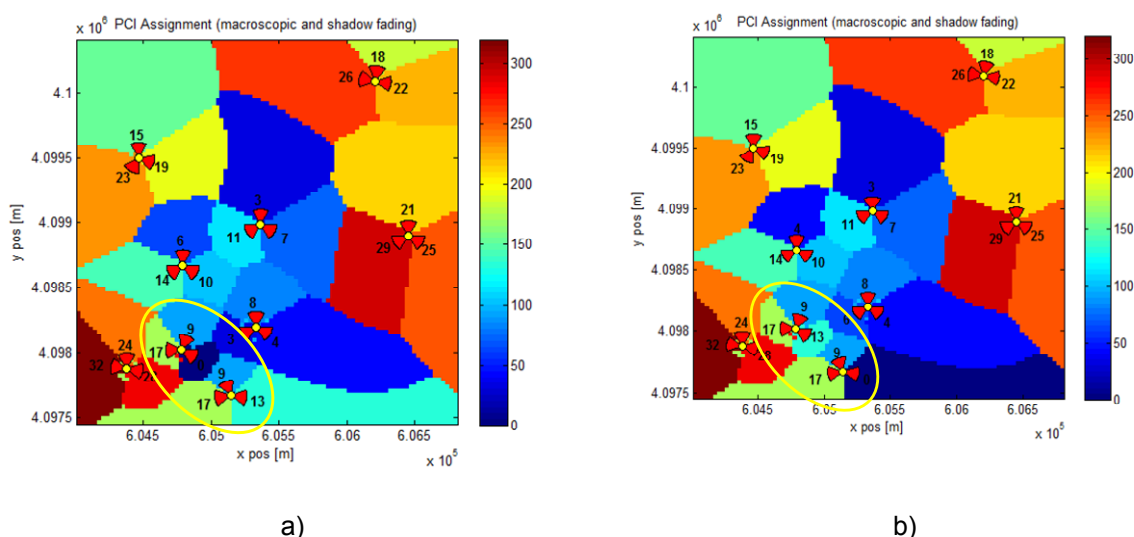



Figura 5.15 – Alocação de PCI; a) Cenário com 10 Utilizadores/Célula b) Cenário com 20 Utilizadores/Célula.

Até este ponto pode-se concluir que o método adoptado não é suficientemente eficaz para resolver todos os conflitos de PCI existentes e daí reduzir o número de utilizadores bloqueados. Sendo o conflito de PCI uma situação muito indesejada, pretende-se que esta seja resolvida no menor tempo possível. Para melhorar o desempenho do mecanismo de resolução de conflitos de PCI mantendo o mesmo período de simulação, resolveu-se analisar novamente o algoritmo proposto por [AmFr08]. Da informação disponibilizada por [AmFr08], não se consegue tirar conclusões quanto à necessidade de contabilizar os PCI co-localizados no processo de resolução de conflitos. Para além disso não é dada nenhuma indicação quanto à periodicidade com que um UE deverá enviar os relatórios periódicos de *handover*. Assim, tomou-se a opção, de se realizarem algumas alterações ao algoritmo original para que este, independentemente de existir ou não relações vizinhança, contabilize os PCI dos sectores co-localizados. Para além disso, reduziu-se o período com que os relatórios periódicos são enviados por cada UE. A Tabela 5.7 indica os novos parâmetros de simulação.

Tabela 5.7 – Resolução de PCI (Algoritmo Optimizado) – Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Modo de Canal	VehA
Ambiente	Outdoor
Nº de UE	{270;540}
Velocidade do UE	Aleatória, (até 120 Km/h)
Duração	500 TTI
Período de Envio de Relatório	25 TTI

A Figura 5.16 ilustra o número e a percentagem de UEs bloqueados em função do TTI após as alterações efectuadas.

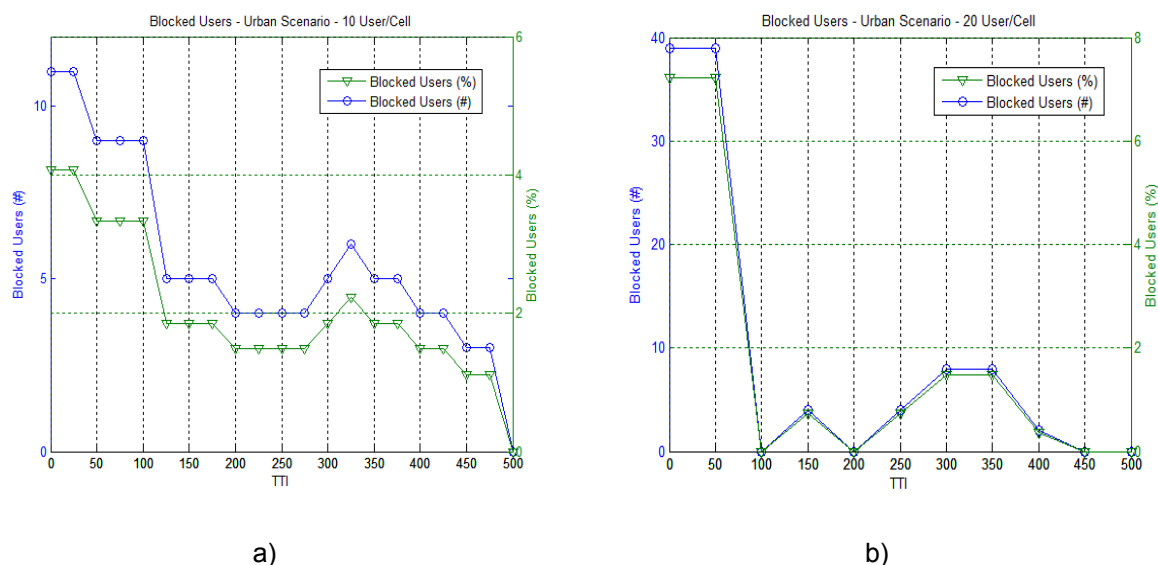



Figura 5.16 – Número de UEs Bloqueados e Número de Handovers; a) 10 UE/sector; b) 20 UE/Sector.

Pela análise da Figura 5.16, rapidamente se conclui que as alterações efectuadas permitiram a eliminação da totalidade dos utilizadores interferidos, alcançando assim uma situação onde a rede se encontra estável. Na Figura 5.17 podemos observar a alocação final de PCI após a realização das simulações. Como se pode observar, graças às alterações efectuadas, vários PCIs foram alterados de modo a acomodar o novo eNodeB. Estas alterações permitem assim colmatar o aparecimento de conflitos de PCI. De recordar que a resolução de PCI é realizada célula a célula o que significa que, uma vez detectado um conflito de PCI, não é atribuído um *Physical Identity Group* à BTS, mas em vez disso apenas à célula conflituosa.

a) b)

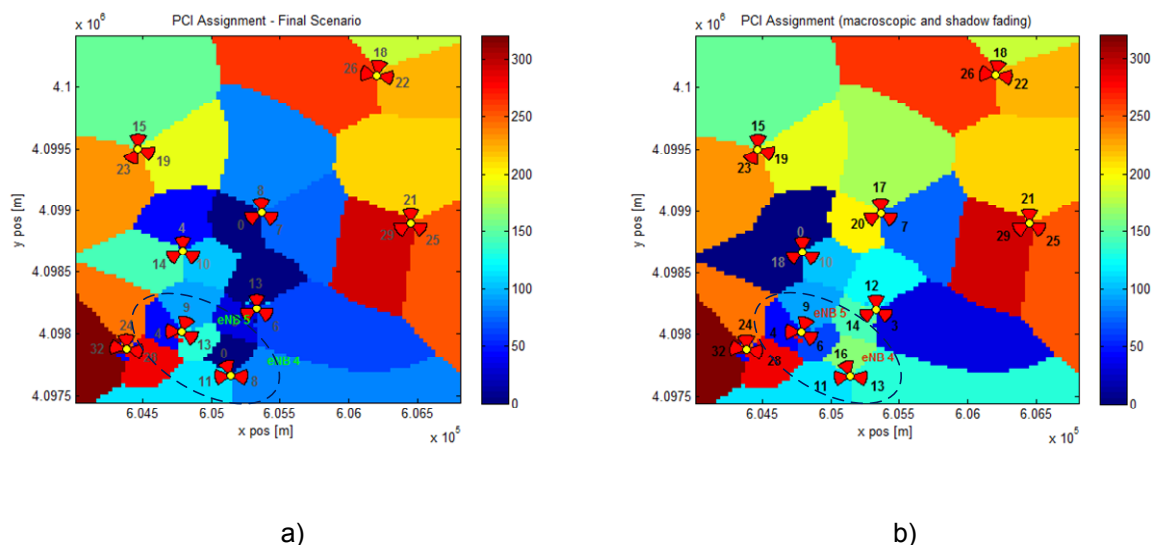



Figura 5.17 – Alocação de PCI; a) Cenário com 10 Utilizadores/Célula b) Cenário com 20 Utilizadores/Célula.

No trabalho realizado por [AmFr08] é assumido que a rede atinge a estabilidade quando todas as relações vizinhança previstas são estabelecidas pelo algoritmo de ANR. Uma vez que um UE, devido ao nível de sinal recebido, poderá não despoletar um processo de *handover* ao longo de todo o período de simulação, não é fiável concluir que a estabilidade da rede é alcançada, pois o algoritmo de ANR não chega a reunir a informação necessária. Para além disso, não é colocada a hipótese de ocorrer um bloqueio no UE devido à recepção do mesmo PCI de uma célula cujo ECGI é diferente. Desta forma não será realizada uma comparação dos resultados obtidos pelo simulador com os obtidos por [AmFr08].

5.3.2.2 Automatic Neighbour Relations

Para analisar o desempenho da função ANR efectuou-se uma simulação da mesma em cada um dos cenários, e em cada uma destas foram contabilizados o número de comandos de *handover* efectuados, a taxa de sucesso por cada período de 50 TTIs e as relações que, através destas mesmas simulações, foram estimadas. Cada simulação tem a duração de 1000 TTI, um SINR mínimo de acesso à célula de -10 dB, como sugerido por [HoTo09] para um débito mínimo de 1 Mbps em *downlink* e para receptores com sistema de antenas MIMO, e cada UE possui um tipo de serviço e velocidade aleatórios. A Tabela 5.8 resume os parâmetros de simulação para a análise da função ANR implementada.

Tabela 5.8 – ANR – Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Número máximo de NRs	32
Threshold para iniciar medidas	-100 dBm
Sensibilidade do UE	-133 dBm
SINR mínimo	-10 dB
Duração	1000 TTI

Considera-se que cada célula só poderá ter simultaneamente 32 relações vizinhança e que cada UE dá inicio à medição do sinal das células interferentes quando o sinal da sua célula de serviço desce abaixo dos -100 dBm. Considera-se ainda que todos os UE que apresentam um SINR inferior a -10 dBm, são forçados a permanecer na célula origem até reunirem novas condições para *handover*, o mesmo acontece quando o sinal recebido é inferior à sensibilidade do UE. Na Figura 5.18 e Figura 5.19 poderão ser observados os indicadores de *handover* recolhidos para cada cenário simulado.

a) b)

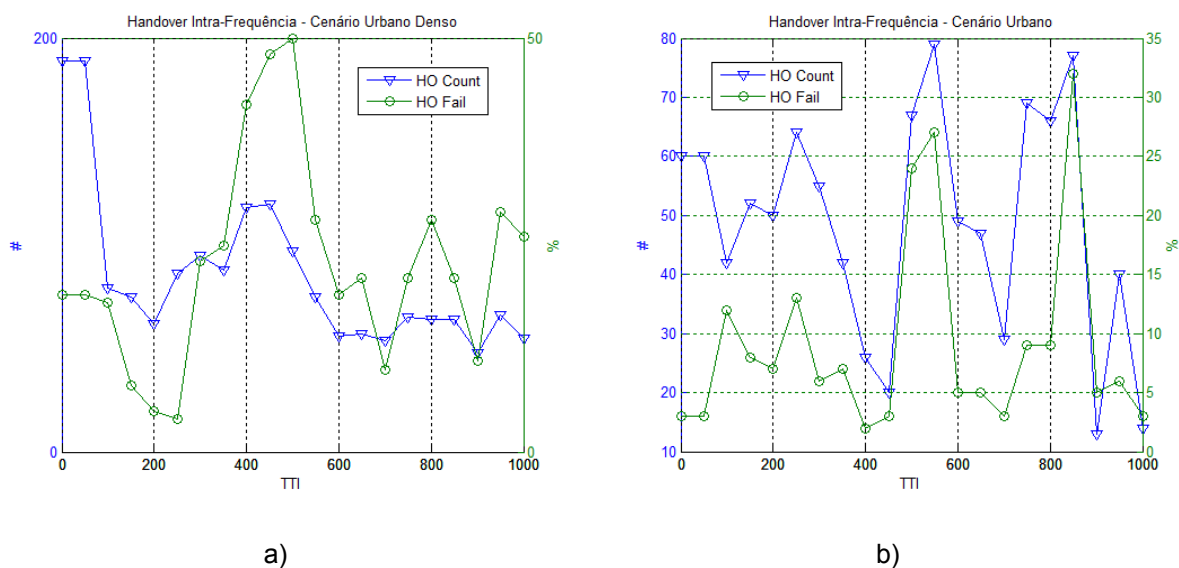



Figura 5.18 – Número de Handover e Taxa de Falha de Handover médios; a) Cenário Urbano Denso; b) Cenário Urbano.

a) b)

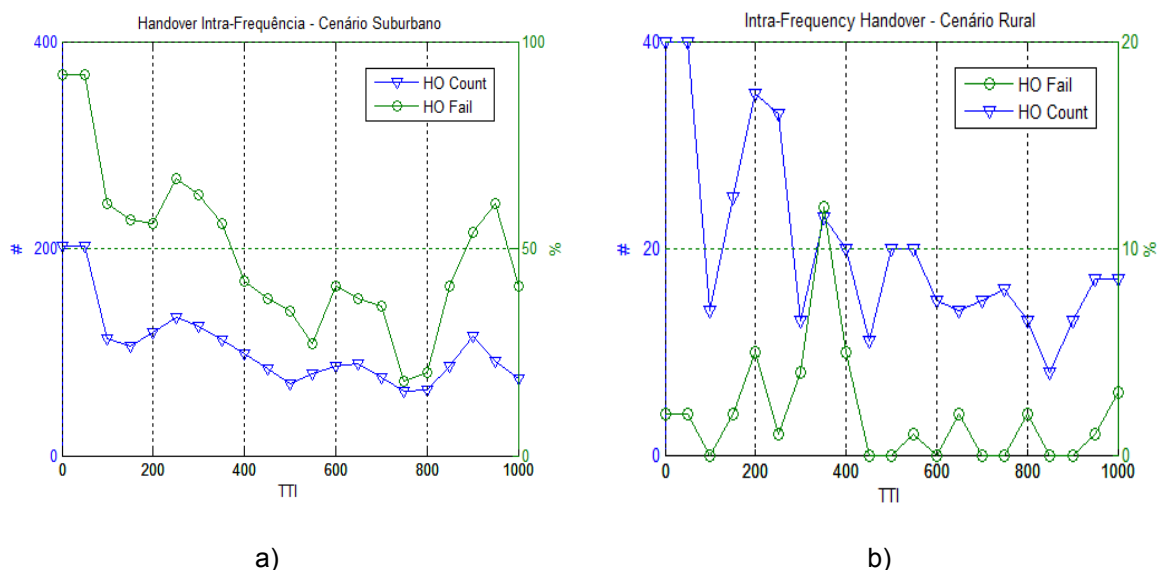



Figura 5.19 – Número de Handover e Taxa de Falha de Handover médios; a) Cenário Suburbano; b) Cenário Rural.

Através destes indicadores podemos verificar que o cenário Urbano Denso e Suburbano são os que apresentam uma maior média de *handovers* falhados, distanciando-se dos cenários Urbano e Rural. Nota ainda que os cenários Urbano e Rural possuem, em média, um menor número de tentativas de *handovers*. A razão pela qual existe esta diferença entre os resultados obtidos em cada cenário deve-se essencialmente à densidade de utilizadores em cada um dos cenários, e à forma como a ROI pode ser definida. No primeiro caso, a aleatoriedade com que os UEs são colocados na ROI, e a forma como estes se movimentam, faz com que as condições de recepção não sejam iguais para todos. No segundo caso, devido a limitações do simulador desenvolvido, só é possível desenhar polígonos rectangulares, o que provoca o aparecimento de zonas limite onde o sinal recebido é inferior e onde UEs, localizados junto à fronteira, poderão ter más condições de recepção durante todo o período de simulação.

Com base nas simulações realizadas efectuou-se igualmente um levantamento das relações vizinhaça criadas, comparando-as às estimadas pela ferramenta Atoll® nas mesmas condições de cada cenário. O gráfico da Figura 5.20 compara o número de relações vizinhança estimadas pelo Atoll®, com o número estimado pelo Simulador e o número de relações que foram igualmente estimadas por ambos. De referir que, tanto as simulações efectuadas pelo simulador, como as efectuadas pelo Atoll®, foram forçadas a criar simetria em cada relação vizinhança criada.

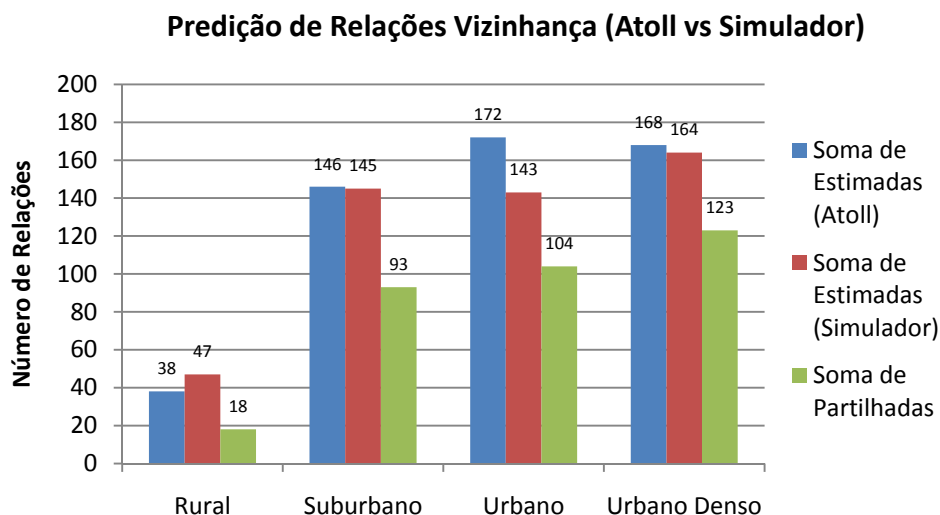



Figura 5.20 – Comparação da predição de vizinhas efectuada entre o Atoll® e o Simulador.

Através do gráfico da Figura 5.20 podemos concluir que o simulador é mais eficaz no processo de estimação de relações vizinhança em ambientes urbanos, do que em ambientes rurais. Esta situação é mais evidente no cenário Urbano Denso onde o número de relações igualmente estimadas pelo Atoll® e pelo simulador é de 123, o que constitui cerca de 73% das relações estimadas pelo primeiro. No cenário Urbano, 60% das relações estimadas pelo Atoll® são também estimadas pelo simulador. No cenário Suburbano, 63% e no cenário Rural 47%. Apesar dos resultados obtidos, tendo em conta as condições de simulação, nomeadamente o número de utilizadores usado, duração e SINR mínimo de acesso, considera-se positivo o desempenho da função implementada.

5.3.2.3 Optimização de Handover

No capítulo 4 propôs-se um algoritmo capaz de detectar e controlar a oscilação de *handover* numa rede LTE, através da optimização automática dos parâmetros *handover*, com base na taxa de oscilação de *handover*, HPI_{HPP}, calculada a partir do relatório de medidas enviado por cada UE. Assim, para avaliar da forma mais precisa quanto possível o desempenho do algoritmo desenvolvido, começa-se por analisar os valores de HPI_{HPP} obtidos para cada cenário. Para cada um realiza-se uma simulação sem e com optimização. A Tabela 5.9 descreve os valores definidos para cada parâmetro de *handover*. A parametrização escolhida visa criar uma situação limite onde a oscilação de *handover* tem elevada probabilidade de ocorrer.

Tabela 5.9 – Optimização de Handover – Parâmetros de Simulação.

Parâmetro	Valor
Histerese {Inicial, Máxima, Mínima}	{3, 6, 2} dB
TTT {Inicial, Máximo, Mínimo}	{3, 12, 2} TTI
Tempo Crítico de Oscilação	15 TTI
Delta {Incremento, Decremento} de Histerese	{1, 1} %
Delta {Incremento, Decremento} de TTT	{50, 50} %
Contador {Inicial, Final} de Boa Performance	{5, 5} TTI

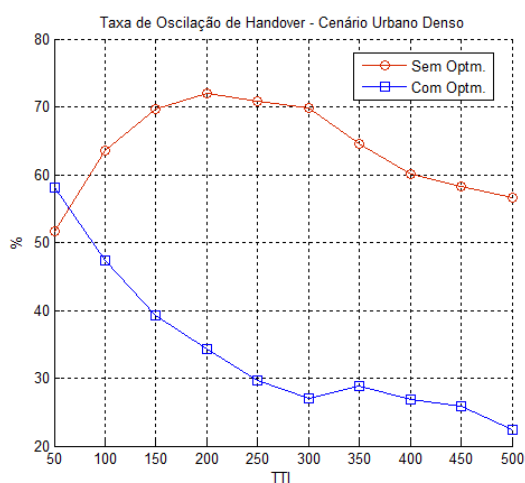
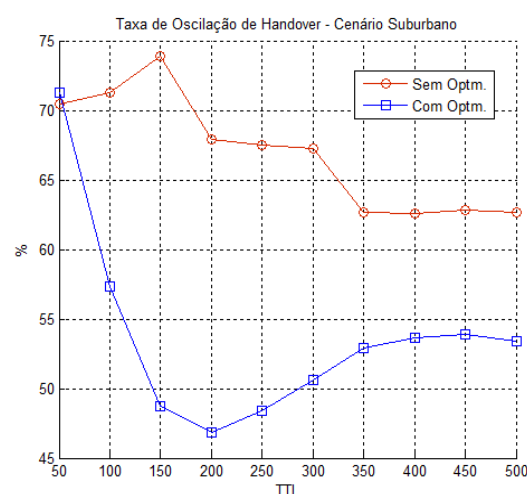
Cada UE desloca-se a uma velocidade aleatória que poderá ir de 1 a 120 Km/h e a cada um é atribuido um tipo de serviço aleatório, que poderá ser qualquer um dos descritos na Tabela 4.2. Cada TTI corresponde a 1 ms e de modo a minimizar o tempo de simulação, todos os valores temporais de *handover* foram normalizados por 1000 ms. A Figura 5.21 e Figura 5.22 ilustram os valores de HPI_{HPP} obtidos para cada cenário para as situações sem e com optimização de *handover*. Nota que o valor de HPI_{HPP} apresentado representa a média dos valores registados entre todas as células.

a) b)

Figura 5.21 – Taxa de Oscilação de Handover sem e com optimização; a) Cenário Urbano Denso b) Urbano.

a) b)

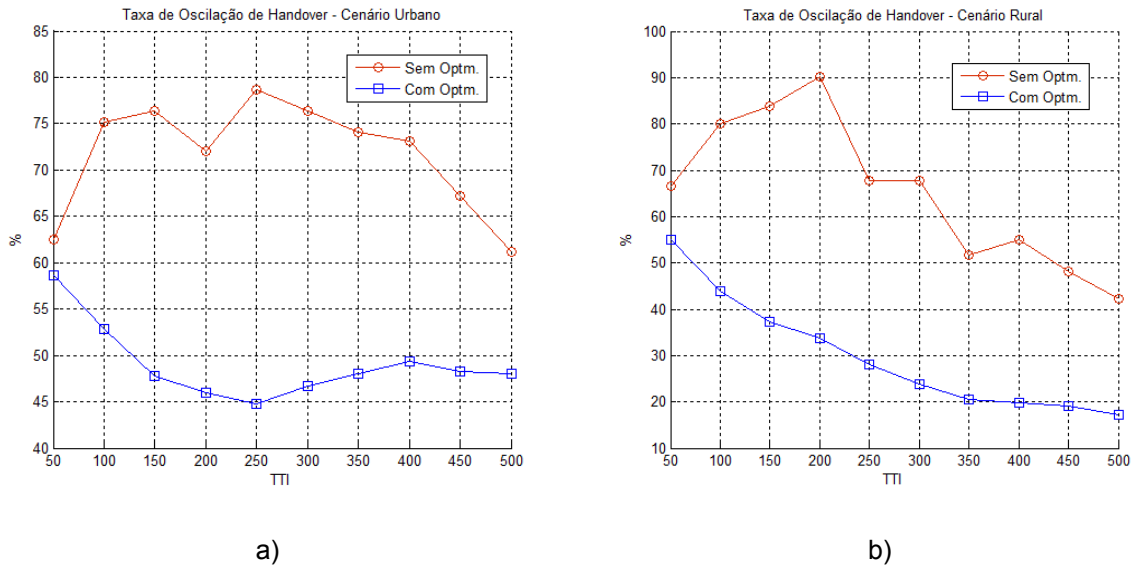



Figura 5.22 – Taxa de Oscilação de Handover sem e com optimização; a) Suburbano b) Rural.

Como pode ser observado, no geral, é notória a melhoria que é introduzida com o algoritmo de optimização, à medida que o número de TTIs aumenta. De entre todos os cenários podemos verificar que o cenário Urbano é o que apresenta uma maior redução no HPI_{HPP}, atingindo uma diferença de 34% entre a situação não optimizada e optimizada. De seguida, destaca-se o cenário Rural onde o HPI_{HPP} atinge uma redução de 25% seguido do cenário Suburbano e Urbano com 14 e 9% respectivamente. A razão pela qual a maior redução de HPI_{HPP} é atingida no cenário Urbano Denso poderá dever-se a dois factores que se relacionam entre si e os quais já foram identificados, aquando da análise da função ANR: densidade de utilizadores e definição da ROI. Porque cada cenário tem diferentes densidades de utilizadores e porque cada UE assume inicialmente uma localização, velocidade e direcção aleatórias, o número total de tentativas de *handover* irá variar, ou seja, o número de iterações que serão realizadas pelo algoritmo de optimização irá variar. Tal como foi descrito na análise da função ANR, porque a ROI poderá apenas assumir uma forma rectangular, e porque o número de BTS não abrange todo o mapa, existirão sempre zonas onde os UEs irão ter menores condições de recepção e como tal, mais falhas de *handover* irão ocorrer o que irá influenciar o resultado final da optimização de *handover*. A definição de ROIs através de polígonos que se ajustam ao formato do *cluster* permitiria minimizar as zonas de fraca cobertura. A Tabela 5.10 resume os ganhos do HPI_{HPP} obtidos para cada um dos cenários.

Tabela 5.10 – Percentagem de redução do HPI_{HPP}.

	Urbano Denso	Urbano	Suburbano	Rural
Ganho	34,20%	14,10%	9,25%	25,13%

A Tabela 5.11 resume os valores de Histerese e TTT obtidos para cada cenário simulado.

Tabela 5.11 – Histerese e TTT após optimização.

	Urbano Denso	Urbano	Suburbano	Rural
Histerese (dBm)	3	3,5	2	2,4
TTT (TTI)	12	11,6	9,5	12

Como se pode observar, face aos valores iniciais definidos para a Histerese e TTT, o algoritmo optimiza cada cenário de modo a minimizar a taxa de oscilação de *handover*. Em termos de histerese, no cenário Urbano Denso e Urbano, esta apresenta um valor superior quando comparada com a dos cenários Suburbano e Rural. Esta situação ocorre pois nos primeiros dois cenários, o UE tem uma maior probabilidade de oscilar entre célula devido ao próprio ambiente de propagação e como tal, um maior valor de Histerese é atribuído. Quanto ao TTT, verifica-se que este é maior nos cenários Urbano Denso, Urbano e Rural quando comparado com o obtido pelo cenário Suburbano. No caso do TTT, é de esperar um maior valor nos cenários Urbanos dado que estes, pelas condições de propagação, estão mais sujeitos a oscilação de *handover*. O facto do cenário Rural ter recebido um TTT tão elevado deve-se essencialmente, como já foi anteriormente referido, ao menor número de iterações que são efectuadas pelo algoritmo de optimização, devido à menor densidade de utilizadores. Se o número de iterações fosse controlado, seria de esperar um menor TTT no cenário Rural.

Como foi descrito no capítulo anterior, o algoritmo desenvolvido contabiliza, para além do HPI_{HPP}, também a velocidade e tipo de serviço dos UEs para optimizar os parâmetros de *handover*. Para verificar qual o desempenho do algoritmo nestas condições foram realizadas simulações com os cenários Urbano Denso e Rural, usando diferentes velocidades e tipos de serviço. No que diz respeito aos serviços, foi considerado o HTTP para serviços do tipo NRT e VoIP para serviços RT. No que diz respeito à velocidade, considerou-se que os UEs poderão circular a velocidades aleatórias de 3, 60 e 120 Km/h. As Figura 5.23 e Figura 5.24, ilustram os resultados obtidos, para cada situação sem e com optimização, respectivamente.

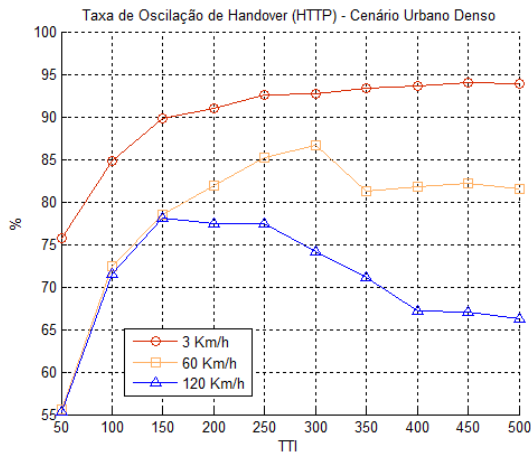
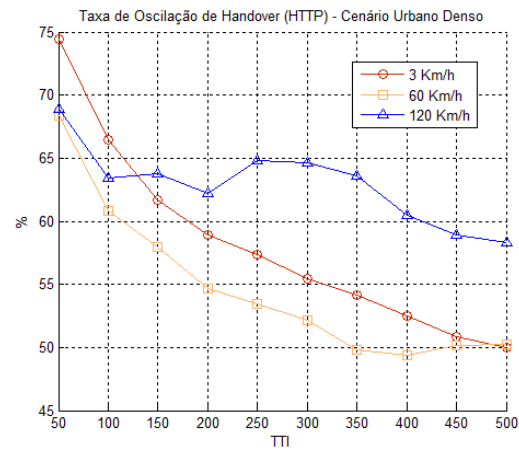
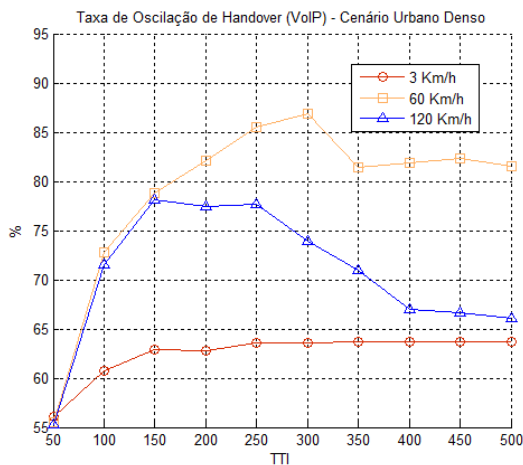
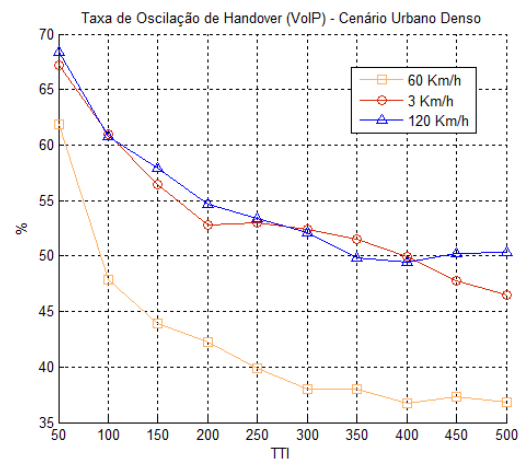



Figura 5.23 – Taxa de oscilação de handover no cenário Urbano Denso; a) HTTP sem optimização; b) HTTP com optimização; c) VoIP sem optimização e d) VoIP com optimização.

As Tabela 5.12 e Tabela 5.13 ilustram os ganhos em percentagem obtidos com a aplicação do algoritmo de optimização em cada uma das situações de serviço e velocidade do UE.

Tabela 5.12 – Percentagem de redução de HPI_{HPP} para cenário Urbano Denso.

	3 Km/h	60 Km/h	120 Km/h
HTTP	43,6 %	31,49 %	7,86 %
VoIP	17,23 %	44,67 %	15,84 %

No cenário Urbano Denso, podemos observar que o maior ganho é obtido quando o tipo de serviço é VoIP e a velocidade máxima é de 60 Km/h, com o HPI_{HPP} a atingir uma

redução de 44,67 %. Podemos também observar que o menor ganho é obtido quando o tipo de serviço é HTTP e a velocidade máxima do UE é de 120 Km/h. Tal como descrito no capítulo anterior, num cenário não optimizado, o HPI_{HPP} é menor quando o UE circula a maior velocidade, o que significa que existe menor oscilação de *handover* tal como se esperava. Da mesma forma, quando a velocidade do UE é menor, em geral, a taxa de oscilação de *handover* é maior, nomeadamente quando o serviço é HTTP.

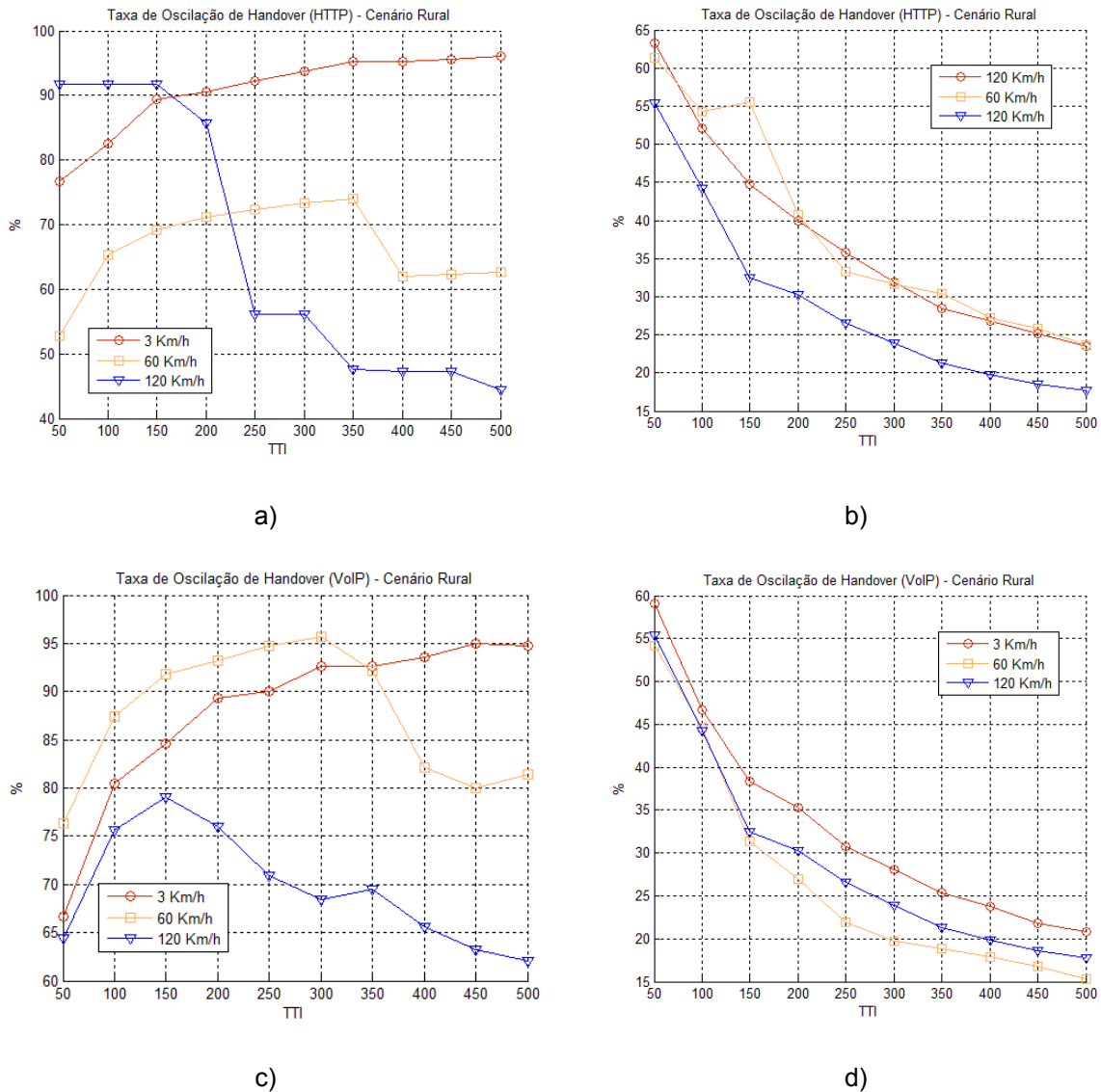



Figura 5.24 – Taxa de oscilação de handover no cenário Rural; a) HTTP sem optimização; b) HTTP com optimização; c) VoIP sem optimização e d) VoIP com optimização.

Tabela 5.13 – Percentagem de redução de HPI_{HPP} para cenário Rural.

	3 Km/h	60 Km/h	120 Km/h
HTTP	72,57 %	38,87 %	26,7 %
VoIP	73,91 %	66,07 %	44,35 %

No cenário Rural podemos observar que o HPI_{HPP} atinge no geral, maiores reduções, contudo, deve ser tido em conta que o número de utilizadores neste cenário é menor, face ao cenário Urbano Denso, pelo que o número de *handovers* é menor e daí menos iterações do algoritmo de optimização são realizadas. Da observação da Figura 5.24 e da Tabela 5.13 podemos observar que os melhores resultados são alcançados quando os UEs têm uma velocidade máxima de 3 Km/h, com o HPI_{HPP} a atingir uma redução de 72,57 % e 73,91 % para os serviços HTTP e VoIP, respectivamente. Também neste tipo de cenário se observa que em situações onde o UE se desloca a alta velocidade o HPI_{HPP} é menor, quando comparado com as situações onde este se desloca a baixa velocidade. Na Tabela 5.14 podemos observar um resumo dos valores de Histerese e TTT obtidos após a optimização nos cenários Urbano Denso e Rural para cada tipo de situação, relativamente ao tipo de serviço e velocidade dos UE.

Tabela 5.14 – Valores optimizados de Histerese e TTT para cada tipo de cenário, {dBm;TTT}.

		3 Km/h	60 Km/h	120 Km/h
Urbano Denso	HTTP	{3,8;10,3}	{3;12}	{2,1;9,3}
	VoIP	{3,1;9,7}	{2,9;12}	{2;12}
Rural	HTTP	{3;10,8}	{2,9;12}	{2;10,9}
	VoIP	{2,9;11}	{2,8;12}	{2,7;12}

Da análise dos resultados obtidos, podemos concluir, tal como esperado, que para uma velocidade baixa a Histerese é, no geral, maior. A baixas velocidades, para um serviço VoIP a Histerese é menor quando comparada com a obtida para o serviço HTTP com a mesma velocidade. Por outro lado, quando a velocidade é alta, a Histerese é menor e quando o serviço é VoIP também esta é menor quando comparada com o serviço HTTP para a mesma velocidade.

Finalmente, como termo de comparação, tomou-se a opção de comparar a taxa de oscilação de *handover*, HPI_{HPP}, obtida para cada cenário e para cada BTS com a obtida numa rede GSM real onde as BTS estão co-localizadas com as BTS LTE apresentadas neste trabalho. A motivação para esta comparação deve-se essencialmente às

semelhanças no processo de *handover* existentes entre estas duas tecnologias. A Tabela 5.15 indica o tempo crítico para ocorrência de oscilação considerado pelo algoritmo utilizado pela rede GSM real e a duração normalizada da amostra recolhida.

Tabela 5.15 – Parâmetros de handover e simulação da rede real GSM.

Parâmetro	Valor
Tempo Crítico de Oscilação	10 TTI
Tempo de amostra	10800 TTI

A Figura 5.25 compara a taxa de oscilação de *handover* em cada BTS do cenário Urbano Denso simulado com o obtido por cada BTS GSM co-localizada de um cenário real.

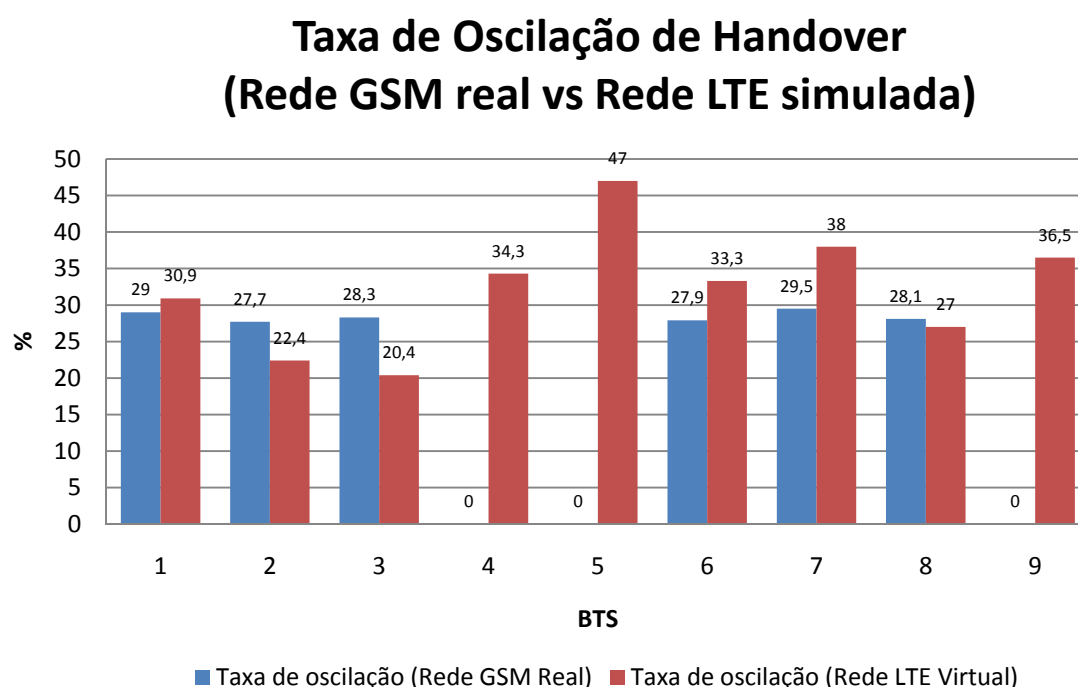



Figura 5.25 – Taxa de Oscilação de Handover para cenário Urbano Denso (Rede GSM real vs Rede LTE simulada).

Como se pode observar, no cenário Urbano Denso, os valores de HPI_{HPP} obtidos por simulação aproximam-se dos registados pela rede GSM real. Nota que, o período de simulação da rede LTE é muito menor que a duração da amostra recolhida pelo que, dada a tendência de decréscimo registada no HPI_{HPP}, como se observou no inicio desta secção, será de esperar um HPI_{HPP} considerávelmente inferior ao registado pela rede GSM. É também de notar que nem todas as BTSs LTE possuem BTS GSM co-localizada, pelo que são ilustradas algumas BTSs com uma taxa de oscilação de *handover* nula. A

Figura 5.26 compara a taxa de oscilação de *handover* em cada BTS do cenário Rural simulado com o obtido por cada BTS GSM co-localizada de um cenário real.

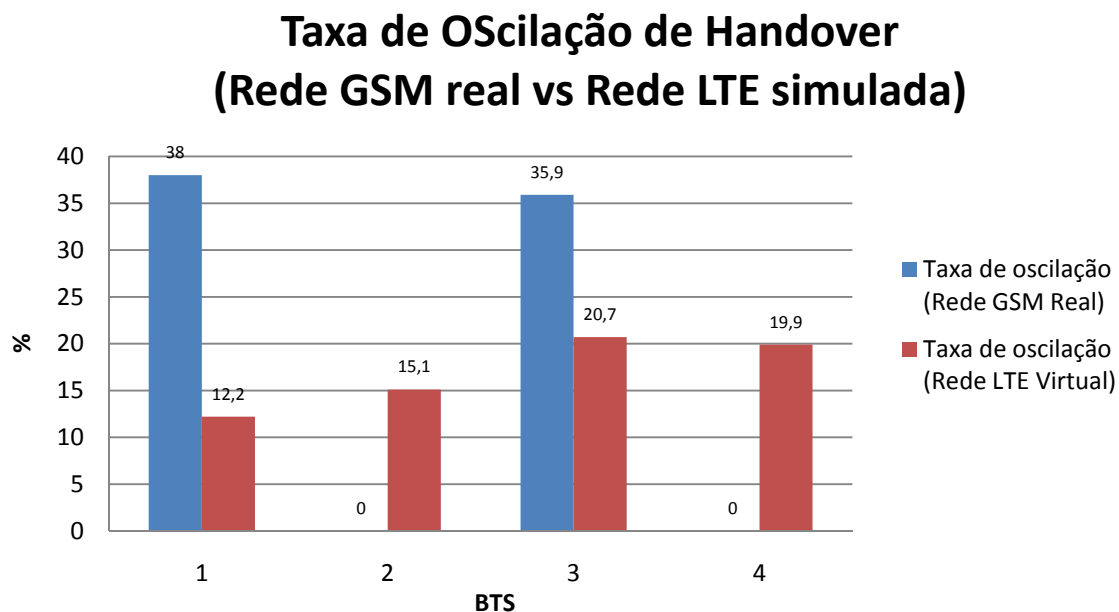



Figura 5.26 – Taxa de Oscilação de Handover para cenário Rural (Rede GSM real vs Rede LTE simulada).

Como se pode observar, no cenário Rural simulado consegue-se obter uma taxa de oscilação de *handover*, HPI_{HPP}, consideravelmente menor à obtida pela rede GSM. A razão para esta diferença deve-se essencialmente às diferentes densidades de utilizadores que podem existir entre o cenário simulado e o cenário real. À semelhança do que se passou no cenário Urbano Denso, as BTS LTE 2 e 4 não têm BTS GSM co-localizado o que justifica a inexistência de dados estatísticos.

Tal como foi referido no capítulo 4, o algoritmo de *handover* desenvolvido, partiu do trabalho apresentado em [LGKi10] no qual, um algoritmo de optimização de histerese e TTT baseado em politicas do sistema é apresentado. Para avaliação deste algoritmo, o autor utiliza a taxa de falhas de *handover*, oscilação de *handover*, e chamadas caídas. Quando comparados com [LGKi10], e considerando apenas o HPI_{HPP}, os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido revelam-se bastante positivos pelo facto de apresentarem uma redução superior no HPI_{HPP} usando um período de simulação consideravelmente inferior.

Capítulo 6
Conclusões

Neste capítulo, são revistos os objectivos propostos para este trabalho, as metodologias adoptadas e os resultados alcançados. Nesta secção, começa-se por rever os principais conceitos estudados relativamente às SON e à forma pela qual estes poderão alterar o paradigma de planeamento e optimização em redes celulares de quarta geração. Posteriormente revê-se o simulador implementado, bem como os algoritmos que permitiram desenvolver e analisar três das principais funções das SON. Finalmente analisam-se os resultados obtidos para um conjunto de simulações efectuadas e propõem-se as melhorias e trabalho futuro.

6.1 Resumo

Este trabalho teve como objectivo estudar o conceito de redes auto-geridas, no contexto do planeamento e optimização, aplicado a redes móveis baseadas na tecnologia *Long Term Evolution* (LTE). Sobre este conceito, tipicamente designado de *Self-Organizing Network* (SON), para além da sua arquitectura e modo de funcionamento, foram estudadas as funções que dele fazem parte. Através deste estudo, são identificadas três funções que, pelas suas características e modo de funcionamento, permitem automatizar algumas das tarefas mais importantes no planeamento e optimização em redes LTE, são elas a: atribuição e detecção de conflitos de PCI (Physical Cell Identity), criação automática de relações vizinhança, tipicamente designada de *Automatic Neighbour Relation* (ANR) e optimização automática de parâmetros rádio, mais concretamente de parâmetros de *handover*. Através do recurso a um simulador do tipo *System-Level*, as funções anteriores são implementadas e utilizando cenários retirados de uma rede real, o seu desempenho é avaliado. Utilizando os resultados obtidos por outras ferramentas de planeamento e optimização, assim como dados estatísticos provenientes de uma rede real, são verificados o bom desempenho e benefício dos algoritmos implementados.

Assim, no capítulo 2 começa-se por apresentar um estudo do conceito de *Self Organizing Networks*. Aqui, começa-se por analisar a sua arquitectura, modo de funcionamento e principais funções que são propostas pelo 3GPP para a sua implementação. Apesar do trabalho já realizado sobre este tema, a decisão de implementação das SON caberá em último lugar às operadoras móveis. Apesar dos benefícios claros que esta tecnologia demonstra, as operadoras continuam ainda receosas quanto ao desempenho destas funções, nomeadamente pelo impacto que poderão ter no desempenho de uma rede.

No capítulo 3 são introduzidos os principais conceitos de planeamento e optimização em redes LTE. Neste capítulo, começam-se por analisar as técnicas para um dimensionamento para qualidade, cobertura e capacidade. Posteriormente, são analisadas as alterações à parametrização, que são feitas com a chegada da tecnologia LTE, nomeadamente no que diz respeito ao TA (Tracking Area), PCI, planeamento de frequências e relações vizinhança. Segue-se a optimização da rede onde, tendo em linha de vista as funções que serão implementadas, é analisado a resolução automática de PCI, a criação automática de relações vizinhança e a optimização de *handover*. É a partir

da análise destes três últimos conceitos que são introduzidos, no capítulo 4, um conjunto de funções que permitem a sua implementação.

No capítulo 4, começa-se por introduzir o "*System Level Simulator of LTE Networks*", um simulador LTE em código aberto, em desenvolvimento pelo Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering da Universidade Tecnológica de Vienna, Áustria (TU- WIEN[10]). O "*System Level Simulator of LTE Networks*" é um simulador que visa o estudo de vários aspectos relacionados com o planeamento, escalonamento e interferência em sistemas LTE. É graças à sua estrutura, bem organizada, e ao funcionamento e desempenho comprovados, que as funções de atribuição e resolução do PCI, ANR e optimização de *handover* são implementadas.

Para tornar possível a implementação destas funções foram necessárias várias alterações à forma como os dados da rede são carregados no simulador, bem como o modo como esta é criada. Para além dos aspectos relacionados com a construção do cenário de simulação, foi necessário proceder a alterações aos elementos de rede, conferindo a estes, por exemplo, no caso do UE, a capacidade de reportar vizinhas ao eNodeB de serviço. Estas alterações tornaram-se imperiosas, pois qualquer uma das funções SON implementadas dependia do correcto funcionamento das restantes. O mau funcionamento de uma função poderia adulterar os resultados obtidos por outra e vice-versa.

No que diz respeito à função de alocação de PCI, dois métodos foram desenvolvidos: sequencial e baseado na distância mínima de reutilização. No método sequencial, os PCI são alocados sem qualquer restrição a cada BTS. No método baseado na distância mínima de reutilização, como o próprio nome indica, uma distância de reutilização é tida em conta de modo a evitar o aparecimento de conflitos de PCI. No seguimento, é apresentada uma função de resolução de PCI. Baseado no trabalho apresentado em [AFGH08], esta função visa, através dos relatórios de medidas enviados pelos UEs, detectar eventuais conflitos de PCI, que possam ocorrer na sequência da entrada de um novo elemento de rede. De seguida é apresentado um algoritmo de criação automática de relações vizinhança. Este algoritmo, também ele baseado na interpretação de relatórios de medidas, cria relações vizinhança de forma automática, conforme a necessidade do UE. Finalmente apresenta-se também, neste capítulo, um algoritmo de optimização de

[10] http://nt.tuwien.ac.at/ltesimulator

parâmetros de *handover*. Este último algoritmo, com base na medição da taxa de oscilação de *handover* dos UEs, ao nível da célula, optimiza de uma forma contínua os parâmetros de Histerese e TTT (Time-To-Trigger). Para além da mobilidade dos UEs, o serviço e velocidade destes é tido em consideração no cálculo dos parâmetros de *handover* mais adequados.

Devido à impraticabilidade de criar vários cenários através de scripts ou linha de comandos, é também apresentada uma interface gráfica, que acrescenta novas potencialidades ao simulador e que torna o seu uso mais fácil e intuitivo. Através da interface desenvolvida é possivel criar cenários personalizados, com um elevado grau de detalhe e simular as funções SON implementadas. Em adição, é ainda possível visualizar os resultados obtidos após cada simulação e guardar estes e toda a configuração usada em formato de projecto. Através destas alterações ao simulador foi possível conferir a este, a capacidade de simular cenários personalizados, e dessa forma analisar o desempenho dos algoritmos com base em cenários reais.

Finalmente, no capítulo 5 é realizada a análise de desempenho dos algoritmos desenvolvidos, tendo como base cenários reais construídos a partir de dados disponibilizados pela operadora móvel Vodafone. Neste capítulo, começam-se por apresentar quatro cenários: Urbano Denso, Urbano, Suburbano e Rural. Em cada um destes é definida uma minuciosa parametrização, tentando aproximá-los o mais possível, daquilo que seria uma rede comercial LTE. No final, é realizada uma análise a cada uma das funções implementadas.

6.2 Conclusões

No que diz respeito à função de alocação de PCI, tomando como referência o cenário Urbano, são testados os mecanismos de atribuição e resolução de PCI. Na atribuição de PCI, especificamente, são testados os métodos, sequencial e baseado na distância mínima de reutilização. Quando utilizando apenas 4 grupos de PCI, como esperado, verifica-se o aparecimento de zonas onde células com PCI idênticos estão próximas umas das outras. Nas mesmas circunstâncias, é testado o algoritmo de alocação de PCI baseado numa distância mínima de reutilização de 1000 m. Os resultados obtidos são claros. Este segundo método revela-se capaz de separar células com PCI idênticos. Para verificar a influência da distância de reutilização na utilização deste método, simula-se novamente a alocação de PCI para o cenário Urbano, desta vez utilizando uma distância

de 1500 e 2000 m. Para ambas as ditâncias, o algortimo demonstra dificuldade em separar células com o mesmo PCI, o que permite concluir que a distância de reutilização deverá ter em conta a distância a que os eNodeBs se encontram uns dos outros, de modo a tirar maior partido deste.

No que diz respeito ao algoritmo de resolução de conflito de PCI, para o mesmo cenário Urbano, começou-se por simular a introdução de um novo elemento de rede, cujos PCIs já eram utilizados por células já existentes na rede. Definiram-se dois tipos de cenários em função do número de utilizadores por célula: 10 e 20. Uma vez simulados, em ambos os casos, o algoritmo revelou-se incapaz de resolver os conflitos criados. A introdução do novo elemento de rede provocou o bloqueio de 38 e 82 UEs, para os cenários com 10 e 20 utilizadores/célula, respectivamente. A aplicação do algoritmo permitiu uma redução de apenas 4 e 8 UEs na lista de UEs bloqueados, para os cenários com 10 e 20 utilizadores/célula respectivamente. Perante esta situação, o algoritmo proposto em [AmFr08] foi revisto. Esta revisão permitiu identificar situações que não foram claramente expostas pelo documento, mas cuja aplicação poderá melhorar o desempenho do algoritmo, são elas: a contabilização dos PCI dos sectores co-localizados aquando da atribuição de um novo PCI e a redução do período com que os relatórios periódicos são enviados por cada UE. Uma vez realizadas estas alterações, simularam-se novamente os cenários anteriores. Os novos resultados obtidos revelaram a mais-valia das alterações efectuadas, com a eliminação da totalidade dos UEs bloqueados em ambos os cenários.

No que diz respeito à função ANR, cada cenário definido foi simulado e em cada simulação foi contabilizado o número de *handover* realizados e a taxa de *handovers* falhados, tendo em conta um SINR mínimo de acesso de -10 dB. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que os cenários Urbano Denso e Suburbano apresentam uma maior média de *handovers* falhados, quando comparados com os cenários Urbano e Rural. Esta situação deveu-se essencialmente à diferente densidade de utilizadores em cada um dos cenários e à forma como a ROI é definida. Neste último caso, porque a ROI pode apenas assumir a forma de um polígono rectangular, surgem zonas de má cobertura, as quais fazem com que os UEs localizados na zona de fronteira, principalmente nos vértices da ROI, tenham piores condições de recepção e daí provoquem mais *handovers* falhados. Em adição às simulações efectuadas, foi também simulado na ferramenta Atoll® a definição de relações vizinhança para cada um dos

cenários. Este teste teve como objectivo, comparar as relações vizinhança obtidas pelo simulador com as obtidas pelo Atoll®. Neste último teste, verificou-se que as relações vizinhança obtidas pelo simulador desenvolvido se aproximam bastante das obtidas pelo Atoll®, com o primeiro a identificar 73%, 60%, 63% e 47% das relações vizinhança identificadas pelo segundo para os cenários Urbano Denso, Urbano, Suburbano e Rural, respectivamente.

Finalmente, no que diz respeito à função de optimização de *handover*, numa primeira abordagem, para cada um dos cenários, foi analisada HPI_{HPP} para uma situação sem e com optimização. Para cada cenário verificou-se um bom desempenho do algoritmo de optimização, com o HPI_{HPP} a atingir uma redução de 34% para o cenário Urbano Denso, 23% para o cenário Rural e 14% e 9% para os cenários Suburbano e Urbano, respectivamente. Analisando os valores optimizados de Histerese e TTT verificou-se, tal como esperado, que para os cenários Urbano Denso e Urbano, o valor de Histerese é superior ao registado nos cenários Suburbano e Rural, devido às condições de propagação, o que origina uma maior probabilidade de oscilação de *handover*. Esta situação também se verifica ao nível do TTT, registando igualmente valores superiores nos cenários Urbano Denso e Urbano, face aos cenários Urbano e Rural.

Posteriormente, utilizando somente o cenário Urbano Denso e Rural, foi analisado o HPI_{HPP} quando os UEs utilizam o serviço HTTP (serviços NRT) e VoIP (serviços RT) e quando estes se deslocam a uma velocidade máxima de 3, 60 e 120 Km/h afim de, perceber, qual o desempenho do algoritmo em cada uma das situações. No geral, através das simulações efectuadas, verifica-se uma redução considerável do HPI_{HPP}, principalmente quando os UEs de deslocam a baixa velocidade, como é o caso do cenário Rural com um serviço VoIP e uma velocidade de 3 Km/h onde esta redução é de 73,91%. No caso do cenário Urbano Denso, a maior redução no HPI_{HPP} é obtida também quando o tipo de serviço é VoIP, mas ao contrário do cenário Rural, quando a velocidade máxima dos UEs é de 60 Km/h, tendo-se verificado uma redução de 44,67%. Verificou-se também que em ambos os cenários, tal como esperado, a redução do HPI_{HPP} é maior quando o UE se desloca a baixa velocidade e menor quando se desloca a alta velocidade. No que diz respeito aos valores optimizados de Histerese e TTT observou-se que, tal como esperado, a baixa velocidade a Histerese é em geral maior quando comparada com os valores obtidos a alta velocidade. Para além disso, verificou-se que, para a mesma velocidade, a Histerse é substancialmente menor quando o tipo de serviço é VoIP,

comparando com o valor obtido para o serviço HTTP. Esta observação permite concluir que o parâmetro *delta*, apresentado no capítulo 4, permite de facto compensar a histerese em função da velocidade e tipo de serviço.

De forma a estabelecer um termo de comparação e dado o facto de ainda não existirem redes LTE em funcionamento em Portugal, decidiu-se comparar o HPI_{HPP} obtido pelo simulador com o obtido através da recolha de dados estatísticos de uma rede real GSM, cujas BTS são co-localizadas com as BTS LTE dos cenários Urbano Denso e Rural. Da análise realizada, concluiu-se que, apesar do tempo de amostragem ser consideravelmente superior ao tempo de simulação, os valores de HPI_{HPP} simulados estão bastante próximos dos obtidos da rede GSM real, registando inclusivé, valores inferiores no cenário Rural. Apesar das características díspares entre as tecnologias, o facto de o GSM utilizar uma estratégia de *hard handover* semelhante ao LTE, permite concluir que os valores obtidos por simulação aproximam-se daquilo que será de esperar numa rede LTE real.

6.3 Trabalho Futuro

Ao longo deste trabalho foram enfrentados vários problemas, alguns dos quais, tiveram de ser contornados através de soluções alternativas que, embora não sendo as mais precisas, constituiam uma boa aproximação. Um exemplo desses problemas é o acesso de um UE a uma célula aquando do processo de *handover*. Como se pode verificar no capítulo 4, o UE mede o RSRP e calcula a média dos SINRs medidos em cada RB, como forma de verificar se a célula destino apresenta as condições mínimas de acesso. Contudo, há outros factores que poderão condicionar o acesso de um UE a uma nova célula, como por exemplo o RSSI, máxima potência do UE, BLER, etc.. Apesar do simulador em questão ainda se encontrar em desenvolvimento pelo TU-WIEN, segundo este último, não está previsto o desenvolvimento de funções capazes de simular falhas no *link* rádio, sendo essas funções mais indicadas para um simulador do tipo *Link-Level* como o descrito em [MISM11] e [MWIBR09]. A implementação de um mecanismo mais robusto de análise do *link* rádio, permitiria avaliar com mais precisão o efeito de diferentes configurações no processo de *handover* intra-frequência.

Outra melhoria recomendada para este trabalho diz respeito à interface gráfica do simulador. Apesar da maturidade do *software* Matlab®, a criação de GUI (Graphical User Interface) neste continua a ser bastante limitada, para além da performance bastante

baixa, quando comparado com outras soluções existentes no mercado. Graças à capacidade de integração deste *software* em outras aplicações, a interface gráfica deste simulador poderia ser desenvolvida utilizando outras plataformas de desenvolvimento, bem como outras linguagens de programação, como por exemplo C# ou Java. Desta forma, apenas a parte computacional era deixada a cargo do Matlab®.

Finalmente, partindo do trabalho realizado, outras funções das SON, já aqui descritas, poderão ser implementadas e testadas. Um exemplo dessas funções poderá ser a optimização de cobertura através do ajuste automático de *tilt* eléctrico com base nos relatórios de medidas dos UEs. Outra solução poderia passar pelo balanceamento automático de carga.

A adopção do "*System Level Simulator of LTE Networks*" como a base para a implementação e análise das funções SON, permitiu um elevado nível de liberdade ao nível do desenvolvimento, tendo permitido desenvolver várias funções que foram ao encontro das necessidades deste trabalho. Contudo, apesar de se tratar de um projecto em código aberto para a investigação académica, a informação disponibilizada pelo TU-WIEN sobre o simulador é muito escassa, não havendo quaisquer documentações, que não a disponível em artigos que recorrem ao uso deste ou através do seu fórum[11].

[11] http://www.nt.tuwien.ac.at/forum

Anexo A

Funções Avançadas das Self-Organizing Networks (SON)

A.1 Auto-Optimização de Canais Físicos

Os canais físicos do *Long Term Evolution* (LTE) possuem um grande número de parâmetros para configuração, e muitas das vezes, dada a complexidade e intervenções necessárias, estes parâmetros são configurados com os valores por defeito. Esta abordagem, apesar de minimizar o custo operacional, poderá ter efeitos negativos no desempenho da rede. Neste sentido, o estudo realizado em [SOCR08] propõe alguns algoritmos capazes de optimizar a parametrização de canais físicos em *downlink* e *uplink*. Com base nos cenários identificados por [SOCR08], podem-se identificar os possíveis parâmetros de entrada para este tipo de algoritmos:

- Parametrização dos canais físicos configurados nas células vizinhas;
- Tráfego previsto;
- Localização do eNB;
- Configuração do HW do eNB;
- Feedback dos UEs;
- Medições nos canais de UL.

Da execução deste tipo de algoritmo poderá resultar a alteração do seguinte conjunto de parâmetros nos canais de *downlink* e *uplink*:

- Alteração da potência de transmissão;
- Configuração de potência;
- *Power Boosting* no canal de referência em *downlink*;
- Sequências CAZAC (Constant Amplitude Zero Auto-Correlation) para os canais de referência em *uplink*.

Segundo [SOCR08], a aplicação destes algoritmos permitirá a optimização dos canais de *downlink* e *uplink*, na medida em que estes são bem recebidos pelo UE e assim evita quedas de chamadas.

A.1.1 Optimização do RACH

À semelhança do WCDMA, no LTE o RACH é o canal de acesso assíncrono do UE à rede. A configuração do RACH tem um grande impacto no desempenho de uma rede móvel celular na medida em que afecta a probabilidade de bloqueio de acesso do UE à

rede. A má configuração deste canal afecta directamente os procedimentos de *call-setup*, *data-resuming*, *tracking-area-update* e *handover*, introduzindo atraso nos mesmos e taxa de sucesso nos procedimentos de *setup*, *tracking-area-update* e *handover-sucess-rate*. Em adição, a má configuração do RACH poderá influenciar a capacidade da rede, probabilidade de detecção de preâmbulo e área de cobertura. O procedimento de acesso à rede via RACH poderá ser despoletado pelos seguintes eventos:

1. Acesso inicial do UE à rede;
2. Restabelecimento após falha no *link* rádio;
3. *Handover* para uma célula diferente;
4. *Downlink* de dados para o UE fora de sincronismo;
5. *Uplink* de dados de um UE sem sincronismo.

A.1.1.1 Procedimento de Acesso Aleatório

O procedimento de acesso ao meio via RACH é desenrolado por intermédio de uma de duas formas: contencioso e não contencioso. O acesso contencioso é usado para todos os eventos listados anteriormente. Neste cenário, o UE gera um preâmbulo e escolhe uma janela de oportunidade, e com base na informação difundida pelo eNB calcula a potência de transmissão da mesma com base na estimação das perdas de percurso (PL), tendo em conta a potência da portadora piloto e a informação difundida pelo eNB: potência recebida desejada (P_{0_RACH}), *Power Ramping Step* (Δ_{RACH}) e *offset* do preambulo ($\Delta_{Preamble}$). O UE também monitoriza o número de tentativas de transmissão do preâmbulo (m). Para a transmissão inicial ($m = 1$) a potência de transmissão do preâmbulo (P_{RACH}) é dada por, [AFGM09]:

$$P_{RACH} = min\{P_{max}, P_{0_RACH} - PL + (m-1)\Delta_{RACH} + \Delta_{Preamble}\} \quad (1.1)$$

Ao detectar o preâmbulo de acesso enviado pelo UE, o eNB correlaciona-o com todas as sequências de preâmbulo possíveis. Se o preâmbulo for aceite, é enviada a informação necessária a todos os UEs que usaram o mesmo preâmbulo na mesma janela de oportunidade. Se nenhuma resposta for recebida, o UE efectua uma nova tentativa usando um mecanismo de *power ramping*. O *power ramping* é um procedimento onde o UE aumenta gradualmente a potência de transmissão para cada preâmbulo que é retransmitido enquanto não recebe uma resposta do eNB. O funcionamento deste mecanismo poderá ser o seguinte:

- Com base na estimação das perdas de percurso através da medida do RSRP o UE transmite o preâmbulo inicial;
- Se não é recebida nenhuma resposta o UE aumenta a potência de transmissão do preâmbulo.

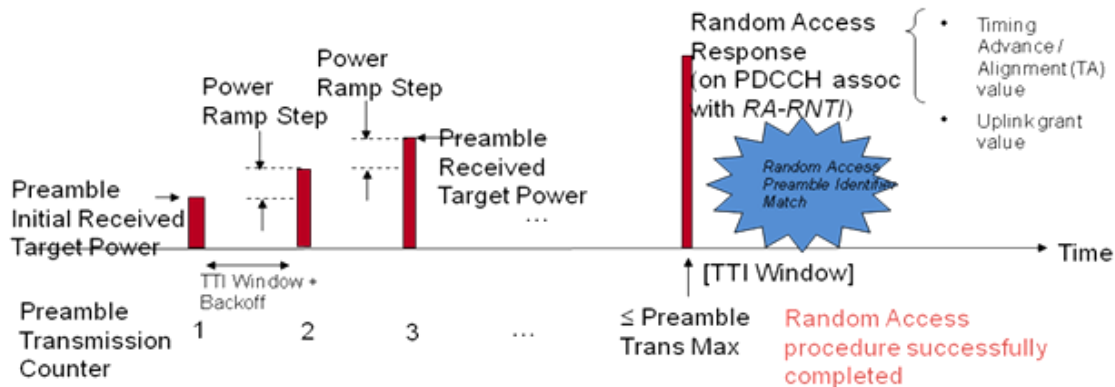



Figura 1.1 – Power Ramping no acesso via RACH, [TR36902].

Neste cenário é possível que mais do que um UE possa transmitir o mesmo preâmbulo, o que exige que o eNB realize um processo de resolução de contenção. Apesar disto, existem situações onde o eNB poderá alocar uma assinatura dedicada ao UE para os procedimentos em que este necessita de receber dados em *downlink* e para os casos de *handover*, acesso não contencioso. Ao contrário do que acontece no WCDMA, em LTE é fixado um número fixo de assinaturas em cada célula, que serão usadas para o acesso contencioso e não contencioso dos UEs à rede, [SeTo09].

De forma geral, os eventos anteriores têm como objectivo, em alguns casos, a sincronização do UE com a rede e noutros a notificação da existência deste perante a rede ou o seu acesso à mesma. No caso particular dos eventos (3), (4) e (5) identificados na inicio da secção A.1.1, podemos ter um acesso não contencioso onde para cada UE é atribuída uma assinatura.

A.1.1.2 Algoritmo de Optimização

A configuração do RACH depende de vários parâmetros, de entre os quais:

- A interferência inter-célula em *uplink* do PUSCH – Aplicação de esquemas de controlo de potência de modo a minimizar a interferência inter-célula;
- Carga no RACH (volume de pedidos recebidos, taxa de *handover*, padrão de tráfego e população servida);

- Carga no canal PUSCH – Quantidade de preâmbulo/célula/s;
- Preâmbulos alocados à célula;
- *High-Speed mode* (On-Off);
- Desequilíbrio entre UL e DL.

Factores como a orientação das antenas, potência de transmissão ou *threshold* de *handover* poderão afectar a performance do RACH. Segundo [TR36902], as funções primárias numa optimização RACH são:

a) Minimizar o atraso no acesso do UE à rede;

b) Minimizar a interferência em *uplink* causada pelo RACH;

c) Minimizar a interferência durante os acessos RACH.

O algoritmo de optimização tenta automaticamente definir um conjunto de parâmetros relacionados com o desempenho do RACH, como por exemplo:

- PRACH *Configuration Index*;
- PRACH *Transmission Power Control Parameters*;
- RACH *Backoff Parameter* – Indica ao eNB para aguardar um determinado período de tempo antes de voltar a tentar aceder à rede;
- RACH *Preamble Split* – Divisão do preâmbulo;
- RACH *Root Sequence Index* – Sinalizar o UE das sequências disponíveis para acesso aleatório ao meio, através da difusão do RACH *Root Sequence Index* que indica a primeira *root sequence* na célula, podendo o UE derivar todas as restantes sequências possíveis.

A definição exacta dos parâmetros que optimizam o RACH foi deixada em aberto pelo 3GPP, cabendo a cada fabricante definir quais os parâmetros críticos necessários ao aumento do seu desempenho. Um exemplo disso é apresentado em [SOCR08] onde é sugerida a alteração dos seguintes parâmetros para optimização RACH:

- Número de tentativas antes de bloqueio;
- Atraso até nova tentativa de acesso;
- Número de RACH;

- Divisão do preâmbulo (Preamble Split).

O estudo realizado em [AFGM09] baseou-se no cálculo do DMR (Detection Miss Ratio) e CR (Contention Rate) para identificar quais os parâmetros que mais optimizam o RACH. Do estudo realizado, foram identificados alguns parâmetros, tidos como favoráveis à optimização do RACH:

- Carga no PUSCH;
- Aumento de Potência no preâmbulo (Power Ramping Step).

A.1.2 Balanceamento de Carga

O objectivo do balanceamento de carga, ou *Mobility Load Balancing* (MLB), é distribuir a carga numa célula de forma equitativa por todas as outras células vizinhas ou distribuir parte do tráfego de células em situação de congestionamento. Esta função é levada a cabo através da auto-optimização de parâmetros de mobilidade ou através de HO (*handover*). A auto-optimização dos parâmetros intra-LTE e inter-RAT (inter-Radio Access Technology) na própria célula e suas vizinhas poderá aumentar a capacidade do sistema, quando comparado com um mecanismo estático não optimizado de parâmetros de re-selecção/handover.

Existem dois tipos de arquitectura MLB: distribuída e centralizada. A escolha do tipo de arquitectura depende da RAT em causa:

- *Distributed* MLB – Algoritmos correm localmente nos eNB. A informação de carga é trocada entre estações de modo a optimizar os parâmetros de HO e/ou ajustar parâmetros de RRM;
- *Centralized* MLB – Os algoritmos são executados ao nível do core. Estações reportam a sua informação de carga a uma entidade centralizada que, posteriormente envia alterações aos parâmetros de HO de cada estação.

O suporte para a optimização do balanceamento de carga poderá ser alcançado através das seguintes funcionalidades:

- Medição da carga de células entre eNB (troca de informação via interface X2);
- Aplicação de algoritmos para identificar a necessidade de distribuição de carga entre células adjacentes;
- Adaptação de parâmetros de HO e /ou Re-Selecção.

De acordo com o critério de re-selecção, descrito em [TS36304], cabe ao UE classificar as células intra-frequência e inter-frequência com igual prioridade, que obedecem ao critério S (S-criterion), com base no critério R (R-criterion). Através dos critérios R são determinadas classificações à célula de serviço e células vizinhas, R_s e R_n respectivamente. Para a célula servidora e células vizinhas temos respectivamente,

$$R_s = Q_{meas,s} + Qhyst_s \tag{1.2}$$

$$R_n = Q_{meas,n} - Qoffset_{s,n} \tag{1.3}$$

onde $Q_{meas,s}$ e $Q_{meas,n}$ correspondem ao RSRQ, uma medida de qualidade da célula, realizada pelo UE para a célula de serviço e suas vizinhas respectivamente, $Qhyst_s$ é o parâmetro que controla o nível de histerese para a classificação das células e $Qoffset_{s,n}$ especifica o *offset* entre a célula de serviço e respectivas vizinhas cuja prioridade é idêntica. A re-selecção ocorre para a célula mais bem classificada para além da célula de serviço no período mínimo de $T_{reselection}$.

Segundo [FeSe08], a alteração do $Qhyst_s$ irá influenciar a escolha entre a célula de serviço e todas as outras células vizinhas. Uma vez que se pretende controlar a carga entre células adjacentes propõe-se a alteração do $Qoffset_{s,n}$.

A.1.3 Coordenação de Interferência Inter-Célula

O alcance dos débitos anunciados no LTE depende, de entre outros factores, de uma densa reutilização do espectro electromagnético e por conseguinte de uma gestão eficiente da interferência inter-célula. De modo a tirar partido da totalidade do espectro disponível e reduzir a complexidade no planeamento de frequências, poderão ocorrer casos onde as redes LTE usarão um factor de reutilização de 1. Contudo, com o uso de um factor de reutilização de 1, a interferência na periferia das células irá ser considerável, o que poderá conduzir a débitos e níveis de QoS insatisfatórios. O SINR é uma das métricas de desempenho que relaciona o nível de sinal recebido por um utilizador e o nível de sinal interferente. O *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC) em especificação pelo 3GPP é um conjunto de técnicas, que visa a mitigação dos efeitos provocados pela interferência inter-célula de modo a aumentar a performance dos canais comuns PDSCH e PUSCH.

Em OFDM, a interferência inter-célula ocorre quando existe uma colisão entre RBs. Devido ao factor de reutilização unitário, qualquer RB está disponível para transmissão

em cada célula, o que significa que a transmissão no mesmo RB poderá ser agendada entre células vizinhas ao mesmo tempo, provocando uma colisão de RB.

No campo da coordenação de interferência inter-célula, têm sido realizados inúmeros estudos na tentativa de achar técnicas capazes de minimizar a interferência inter-célula e os seus efeitos no desempenho da rede. Estudos como realizado em [RRFo08], sugerem técnicas baseadas em HARQ e *Link Adaptation*. Segundo o 3GPP, estas técnicas poderão ser divididas em reactivas e pro-activas. O esquema reactivo baseia-se em medidas efectuadas no passado. Com base em medidas retiradas, é monitorizado o desempenho e se a interferência detectada atingir valores elevados é feito um ajuste da potência de transmissão ou escalonamento de modo a reduzir a interferência entre células. Num esquema pró-activo, cada eNB informa os seus vizinhos, através da interface X2, da forma como planeia agendar a transmissão dos seus utilizadores no futuro. Desta forma os eNB vizinhos poderão ter esta informação em conta para futuras transmissões.

De acordo com a norma ainda em desenvolvimento, para um esquema pró-activo foi definido um indicador denominado de *High Interference Indicator* (HII) e para o esquema reactivo o *Overload Indicator* (OI). De acordo com a norma, estes indicadores deverão ser trocados entre eNB via interface X2. Esta informação trocada por sua vez servirá ao eNB para ajustar o número e potência de cada RB alocado a cada uma das suas células.

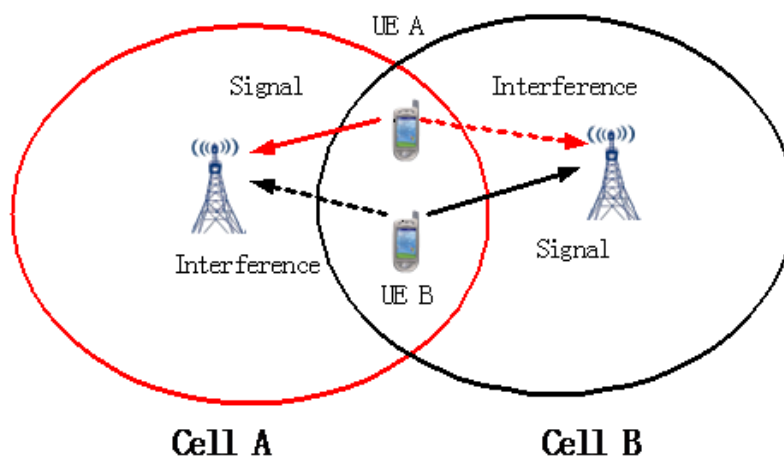



Figura 1.2 – Coordenação de Interferência Inter-Célula em Uplink, [TS32521].

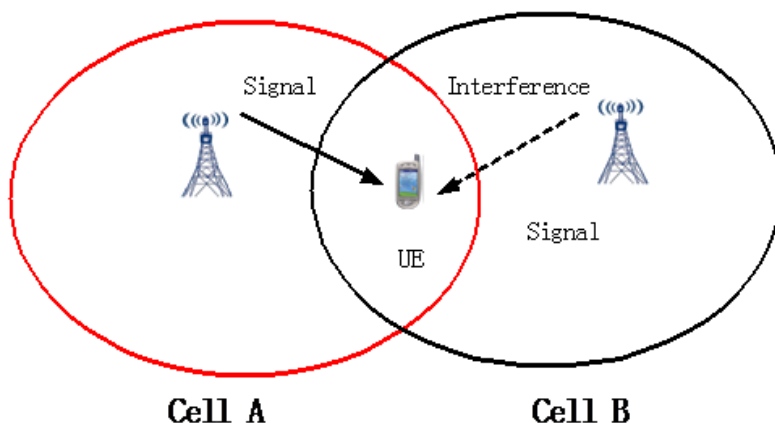



Figura 1.3 – Coordenação de Interferência Inter-Célula em Downlink, [TS32521].

A.1.4 Optimização Avançada de Mobilidade

Segundo [TS36300], uma forma de ajustar estes parâmetros poderá ser alcançada através da análise das falhas no *link* rádio devido à ocorrência antecipada ou tardia de HO, (*Too Early HO Too Late HO*) ou devido ao HO para uma célula errada (*HO to a wrong cell*).

- *Too Late HO* – Considerando o exemplo da Figura 1.4, se a mobilidade do UE é mais agressiva do que os parâmetros de *handover* configurados permitem, o *handover* poderá ser despoletado quando o sinal da célula A já está muito baixo ou poderá mesmo não acontecer por RLF (Radio Link Failure). A ligação poderá então ser estabelecida numa outra célula, célula B, diferente da célula de serviço. Este cenário é frequente em zonas onde a mobilidade dos utilizadores é muito alta, como é o caso de auto-estradas, vias-férreas, etc. Uma vez estabelecida a ligação com a Célula B, é enviado uma mensagem de RLF para a célula A alertando-a para o HO mal sucedido;

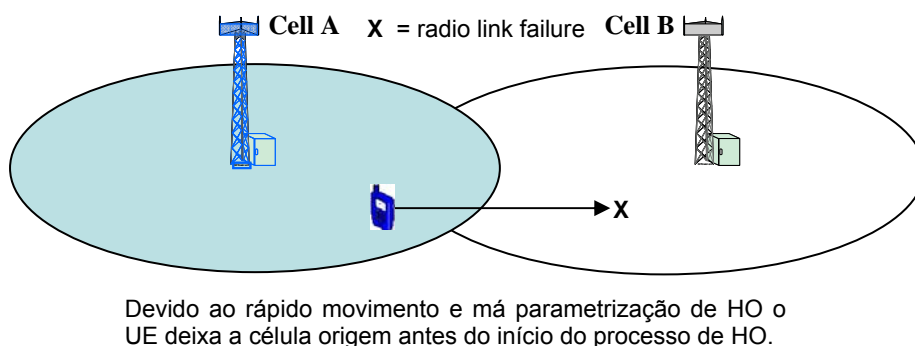



Figura 1.4 – Cenário de atraso de handover, [TS32521].

- *Too Early HO* – Considerando o exemplo da Figura 1.5, o processo de *handover* poderá ser despoletado, quando o UE entra numa zona coberta pela célula B dentro da zona de cobertura da célula A. Quando isto acontece, a célula B poderá enviar uma mensagem de HANDOVER REPORT à célula A indicando a ocorrência de um *Too Early HO* quando recebe uma mensagem de RLF INDICATION da célula A e quando a célula B enviou a mensagem de UE CONTEXT RELEASE para a célula A, indicando a conclusão do HO para o mesmo UE nos últimos segundos de Tstore_UE_cntxt. Este cenário é típico de zonas urbanas, onde a cobertura das células é fragmentada;

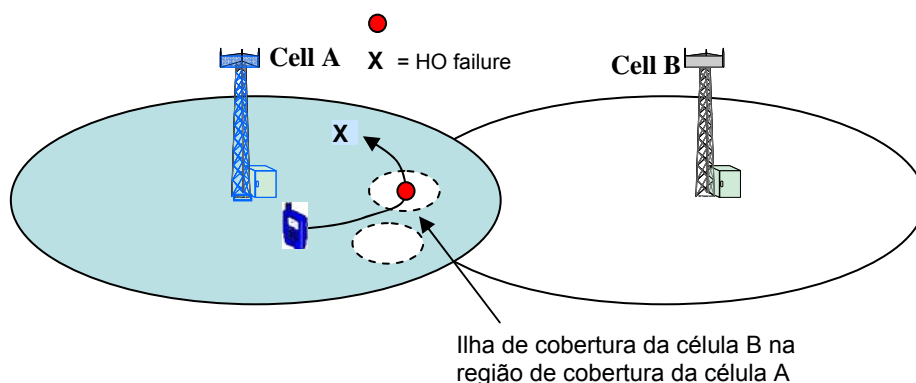



Figura 1.5 – Cenário de handover prematuro, [TS32521].

- *HO to Wrong Cell* – Acontece quando ocorre uma falha no *link* rádio nos momentos que se seguem à conclusão do HO ou durante este. Se o HO da célula origem para a célula destino ocorreu com sucesso e a célula vizinha pertence ao eNB B que é diferente de eNB A, este poderá enviar a mensagem de HANDOVER REPORT para o eNB A indicando a ocorrência de um HO para uma célula errada quando o eNB B recebeu uma mensagem de RLF de um terceiro eNB C e quando eNB B enviou a mensagem UE CONTEXT RELEASE para o eNB A indicando a conclusão do HO para o mesmo UE nos últimos segundos de Tstore_UE_cntxt.

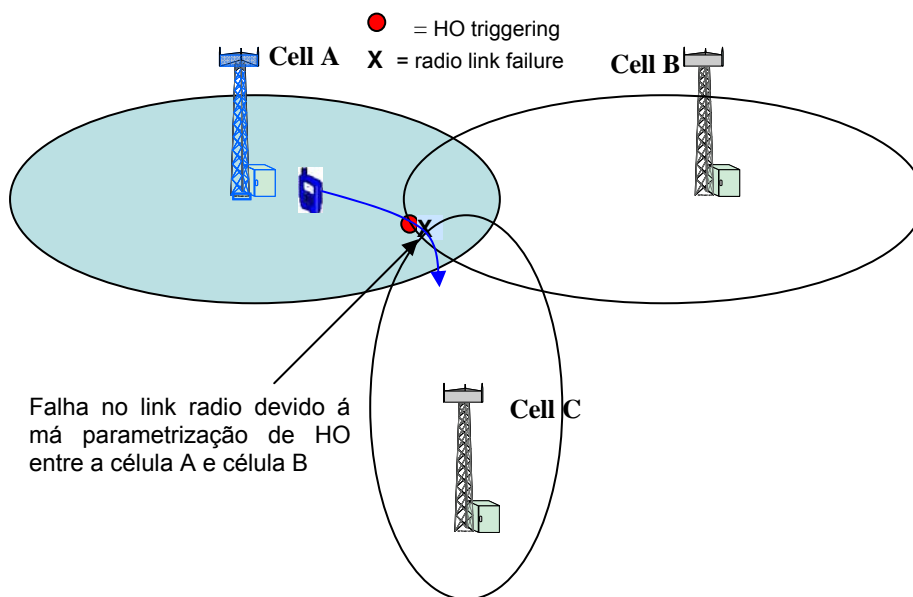



Figura 1.6 – Cenário de handover para célula errada, [TS32521].

Em qualquer um dos casos a mensagem de RLF enviada de um eNB B para um eNB A deverá conter a seguinte informação:

- *Failure Cell ID* – PCI da célula à qual o UE estava ligado anteriormente à falha;
- *Reestablishment Cell ID* – ECGI da célula onde foi feito o restabelecimento do *link* rádio;
- C-RNTI – C-RNTI do UE na célula onde o UE estava ligado anteriormente à ocorrência da falha;
- shortMAC-I (opcional).

A.1.4.1 Detecção de Too Late HOs

A célula origem nem sempre está ocorrente do fenómeno *Too Late HOs*, porque o RLF poderá ocorrer antes que a célula origem seja capaz de receber o *Measurement Report Message* (MRM) do UE. Deste modo, uma solução possível seria a célula destino, para a qual o *link* rádio foi restabelecido, enviar a indicação de RLF através do estabelecimento de uma interface X2.

A.1.4.2 Detecção de Too Early HO

No caso de ocorrência de uma falha do tipo *Too Early HO* de uma célula A para uma célula B, poderá ser reportado da célula A para a célula B, usando o método anteriormente descrito, a indicação de RLF.

A.1.4.3 Redução de HO desnecessários

Um processo de HO consome imensos recursos. A configuração óptima de HO depende muito das condições rádio, o que dificulta o seu controlo manual. Muitas das vezes factores como o padrão de reutilização e zonas limite de cobertura, poderá gerar HO frequentes, o que resulta num maior consumo de recursos da rede. Por outro lado, a configuração incorrecta do HO poderá resultar na falta de HOs que deveriam acontecer. A especificação incorrecta de parâmetros de HO poderá afectar negativamente a experiência do utilizador e desperdiçar recursos da rede ao causar os efeitos de *ping-pong*, falhas de HO e falhas no *link* rádio. A optimização de parâmetros de HO deverá ser capaz de prever tais cenários.

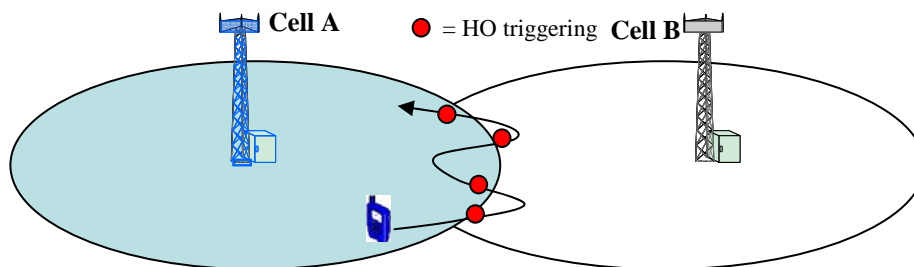



Figura 1.7 – Cenário de handovers frequentes, [TS32521].

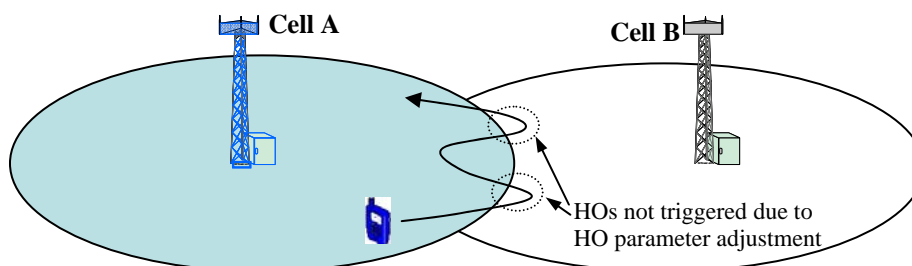



Figura 1.8 – Ajuste de parâmetros para redução do número de handovers, [TS32521].

Para além dos parâmetros de HO, a configuração incorrecta da parametrização para re-selecção de células, poderá resultar em HO indesejados logo após o procedimento de RRC *connection setup*.

A.2 Self-Healing

A quebra de serviço de uma célula poderá ser motivada por falhas de HW ou SW, falha de energia, perda de conectividade com a rede ou mesmo por erro de configuração. Muitas das vezes, a resolução deste tipo de falhas poderá levar horas, o que em determinadas situações poderá ter um impacto negativo no desempenho da rede e nos

indicadores de disponibilidade para além de que, dependendo da localização/abrangência da célula em causa, poderá afectar uma quantidade considerável de utilizadores. Uma das funcionalidades em estudo para as SON, consiste em compensar o desempenho da rede na eventualidade de falha de uma célula, através da parametrização automática das células vizinhas. Pretende-se com esta abordagem compensar o efeito negativo no desempenho da rede que é provocado pela falta de serviço de uma célula. Neste sentido, existem três fases diferentes na detecção de uma falha no serviço de uma célula, são elas:

- Previsão – Análise de medidas reportadas por UE, eNB e O&M (Operation & Maintenance);
- Detecção – Detecção da falha de serviço;
- Compensação – Compensação através da parametrização automática.

A previsão de falha de serviço numa célula é levada a cabo por um algoritmo que, com base em medidas reportadas pelo UE, eNB e O&M, procura antecipar uma eventual falha de serviço e prepara as células vizinhas e parametrizações necessárias à compensação.

A.3 Poupança de Energia

Um dos custos mais críticos para uma operadora móvel está na energia dispendida pelos equipamentos, nomeadamente na RAN, para a sua operação. Tipicamente os equipamentos, particularmente estações base, são dimensionados tendo em conta um cenário de maior carga. Segundo as especificações, a primeira solução para alcançar a redução de custos de operação das RANs, está nas estações base, mais concretamente nas células configuradas nos eNB. Através da desactivação temporária de células, redução de potência ou mesmo redução do número de antenas de transmissão, é possível alcançar ganhos de poupança de energia significativos. Neste sentido, as normas que têm sido desenvolvidas para as SON, prevêem a implementação de algoritmos que, com base na informação de: carga, qualidade de serviço dos utilizadores, estatísticas de tráfego e informação da área de cobertura; conseguem alterar: estado das células do eNB (On/Off), potência de transmissão, definições de potência, número de antenas TX e parâmetros de HO. Apesar da aparente simplicidade do funcionamento, o

algoritmo deverá ter em conta o possível aparecimento de zonas sem cobertura e as regiões de HO entre células.

Anexo B

The Self-Organizing LTE Network Simulator User Manual

B.1 Requisitos Mínimos

B.1.1 Requisitos de Software

Ao nível de software, para executar correctamente esta aplicação o utilizador deverá assegurar os seguintes requisitos:

- Sistema Operativo Windows (XP, Vista ou Seven) 64-bit;
- Microsoft Visual C++ 2008 SP1 (mínimo);
- Matlab® 7.8.0 (R2009a);
- Matlab® Communications Toolbox 4.1;
- Matlab® Signal Processing Toolbox 6.7.

B.1.2 Requisitos de Hardware

Ao nível de hardware, para assegurar uma boa performance da aplicação, o utilizador deverá assegurar os seguintes requisitos de hardware:

- Processador AMD/Intel x86;
- 2048 MB de RAM (mínimo recomendado);
- 4 GB de espaço em disco (mínimo recomendado).

Esta aplicação foi desenvolvida e testada atendendo aos requisitos anteriores, pelo que o seu bom funcionamento não poderá ser assegurado se estes não forem cumpridos.

B.2 Funcionalidades

O "*The Self-Organizing LTE Network Simulator*" é um simulador baseado no "*System Level Simulator of LTE Networks*", (versão 1.3 r427), em desenvolvimento pelo Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering da Universidade Tecnológica de Vienna, Áustria (TU- WIEN[12]). Ao simulador original, foram efectuadas alterações, que incluem uma interface gráfica, e que conferem a este as seguintes funcionalidades:

- Importação de mapas geo-referenciados;
- Definição manual da localização de cada eNB;
- Definição manual da configuração de cada eNB, incluindo potência de saída, número de sectores e respectivas orientações, modelo da antena, MDT (Mechanical Down-Tilt) e EDT (Electrical Down-Tilt), altura e cota;
- Suporte para eNodeB (evolved NodeB) com 1, 2 ou 3 sectores;
- Definição manual da frequência de operação e largura de banda da rede;
- Definição manual do modo de transmissão;
- Definição manual dos modelos de propagação de larga e pequena escala, incluindo desvanecimento por difracção (shadow fading);
- Definição do ambiente de propagação, velocidade, tipo de tráfego, e número de utilizadores;
- Visualização de mapas de cobertura;
- Visualização de mapas de atribuição de PCI;
- Visualização de indicadores de *handover* e resolução de PCI;
- Guardar cenários e resultados em formato de projecto (.mat) para análise futura.

[12] http://nt.tuwien.ac.at/ltesimulator

B.3 Interface

B.3.1 Vista Geral

A Figura 3.1 ilustra o *workspace* do simulador e a descrição dos seus vários componentes.

Figura 3.1 – Interface principal e seus componentes.

B.3.2 Componentes

B.3.2.1 Menu Principal

As figuras que se seguem ilustram as várias opções disponíveis no menu principal correspondente ao ponto A da Figura 3.1.

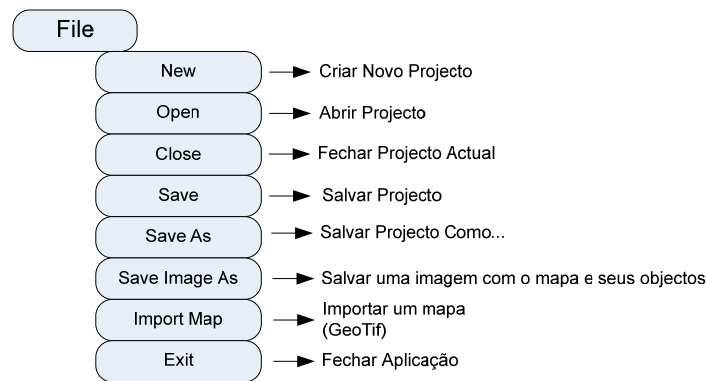



Figura 3.2 – Opções do menu "File".

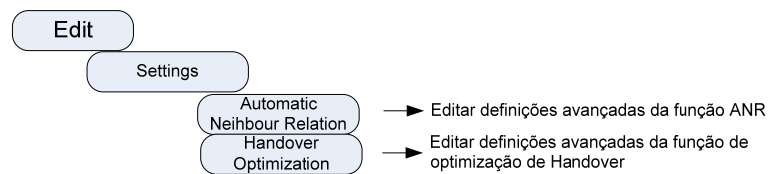



Figura 3.3 – Opções do menu "Edit".

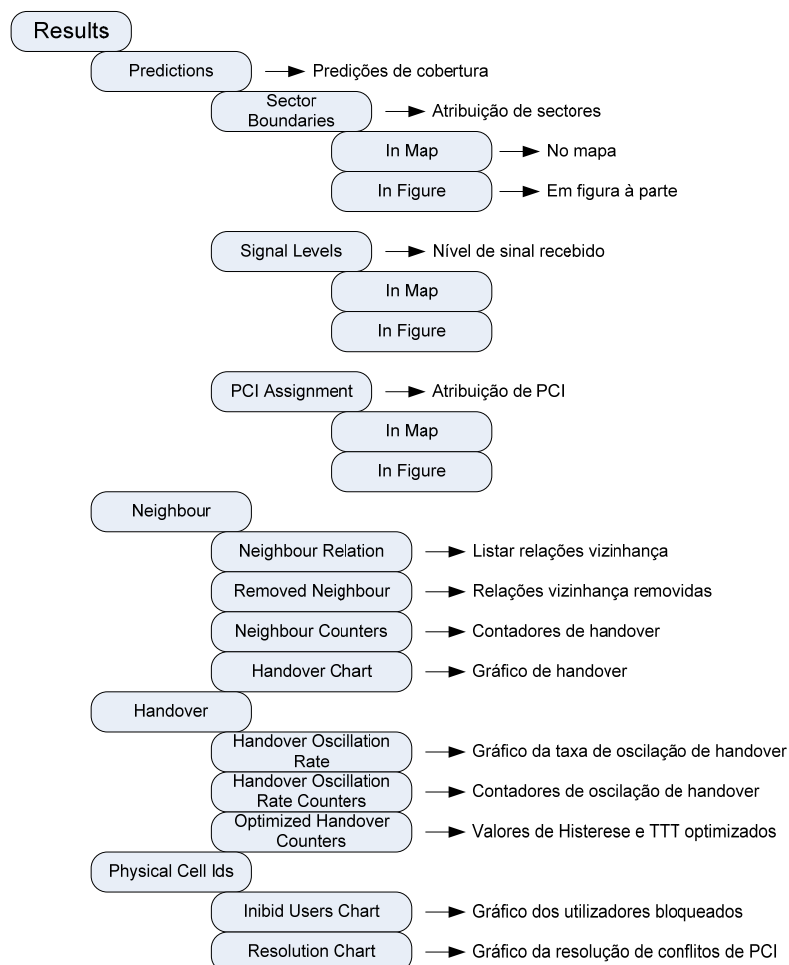



Figura 3.4 – Opções do menu "Results".

Figura 3.5 – Opções do menu "Help".

B.3.2.2 Barra de Ferramentas

A Figura 3.6 descreve os vários componentes da barra de ferramentas correspondente ao ponto B da Figura 3.1.

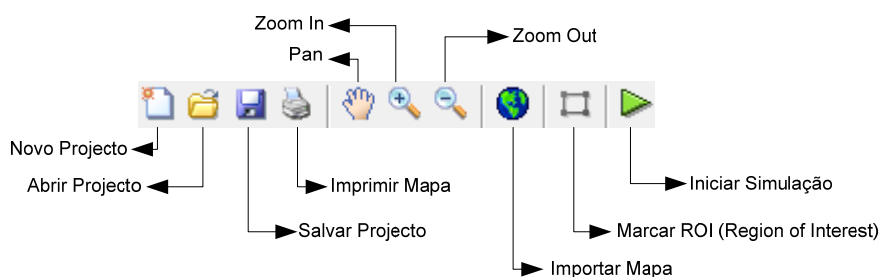



Figura 3.6 – Ilustração da Barra de Ferramentas.

B.3.2.3 Lista de eNodeB

A Figura 3.7 ilustra o painel onde são listados todos os eNodeBs que são criados e respectivas características. Este painel corresponde ao ponto D da Figura 3.1.

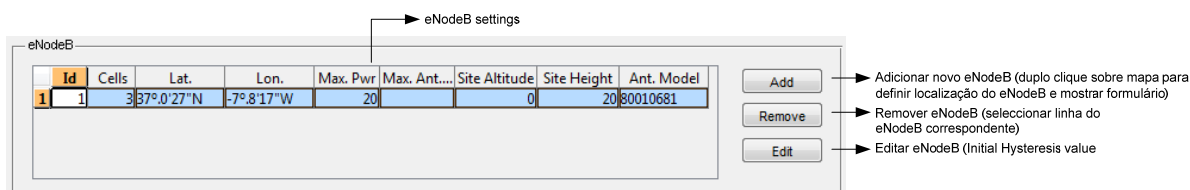



Figura 3.7 – Painel com a lista de eNodeB.

B.3.2.4 Painel de Configurações

As ilustrações seguintes indicam o significado de cada componente de cada painel de configuração.

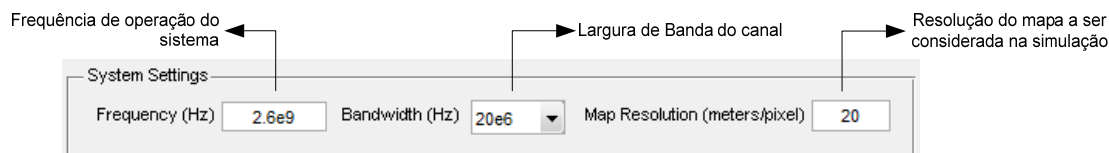



Figura 3.8 – Parâmetros gerais do sistema.

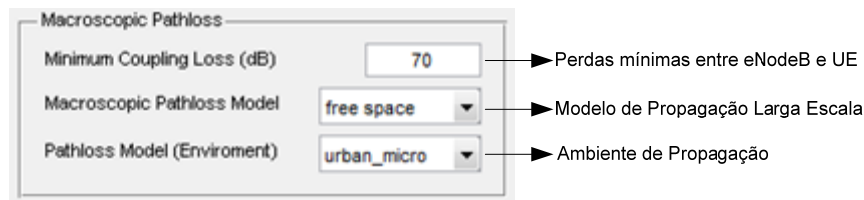



Figura 3.9 – Definições de desvanecimento larga escala.

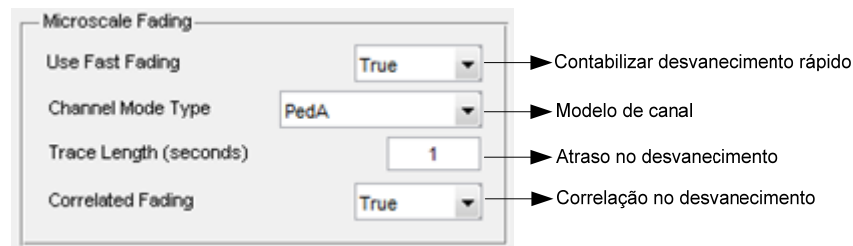



Figura 3.10 – Definições de desvanecimento pequena escala.

Figura 3.11 – Modelo de atenuação por difracção.

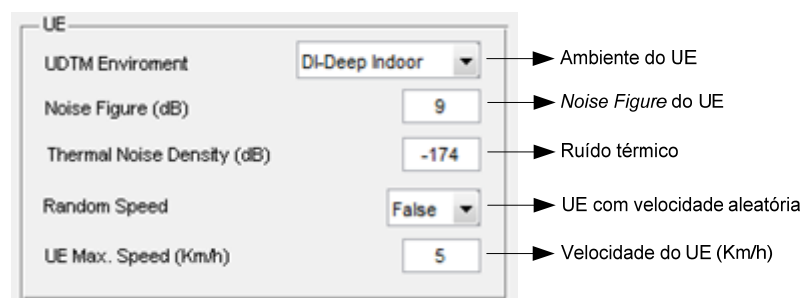



Figura 3.12 – Definições do UE.

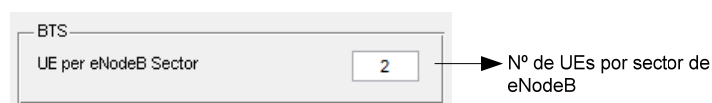



Figura 3.13 – Definições do eNodeB.

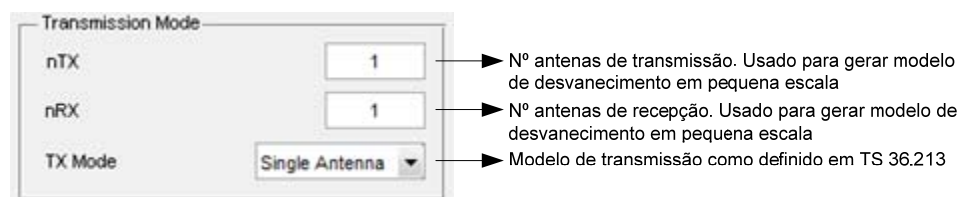



Figura 3.14 – Modelo de transmissão.

Figura 3.15 – Tipo de tráfego realizado pelos UE.

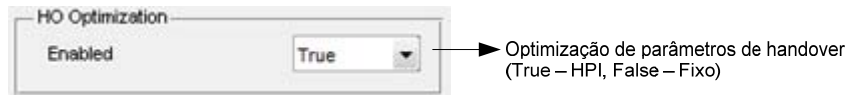



Figura 3.16 – Optimização de parâmetros de handover.

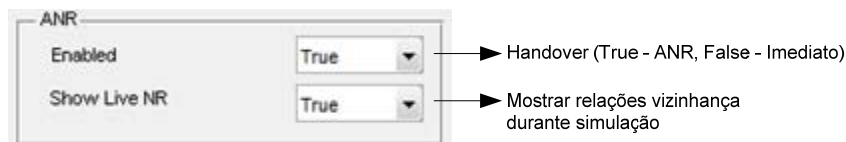



Figura 3.17 – Automatização da criação de relações vizinhança.

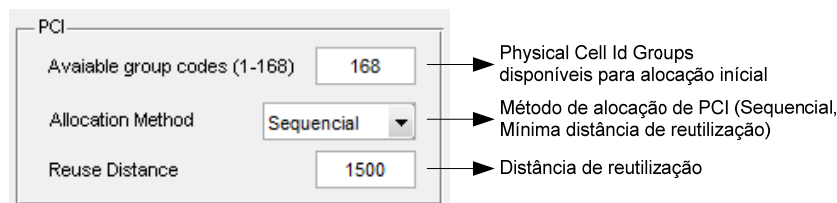



Figura 3.18 – Definições de alocação de PCI.

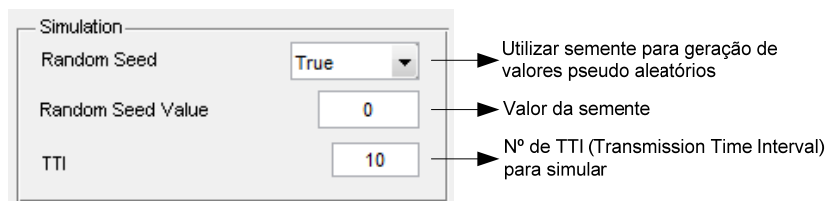



Figura 3.19 – Definições gerais de simulação.

B.4 Definições Avançadas

B.4.1 Optimização de Handover

A Figura 4.1 descreve o significado dos vários campos do formulário para alterar os parâmetros avançados da função de optimização de *handover*.

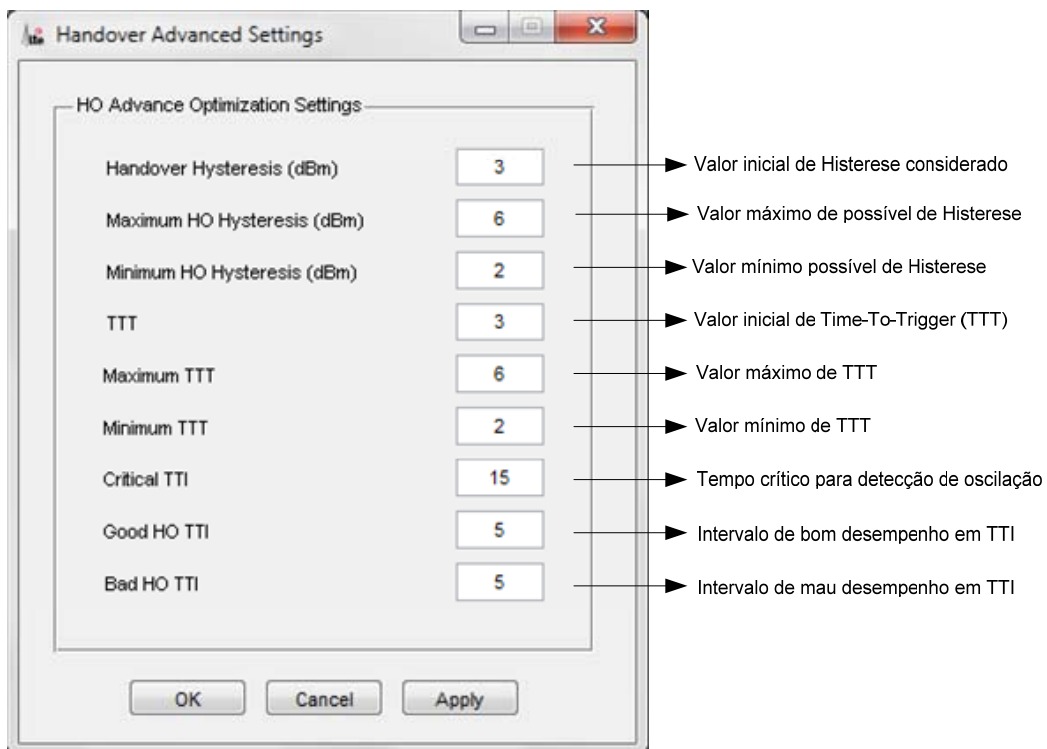



Figura 4.1 – Definições avançadas de handover.

B.4.2 Automatic Neighbour Relation

A Figura 4.2 descreve o significado dos vários campos do formulário, para alterar os parâmetros avançados da função ANR.

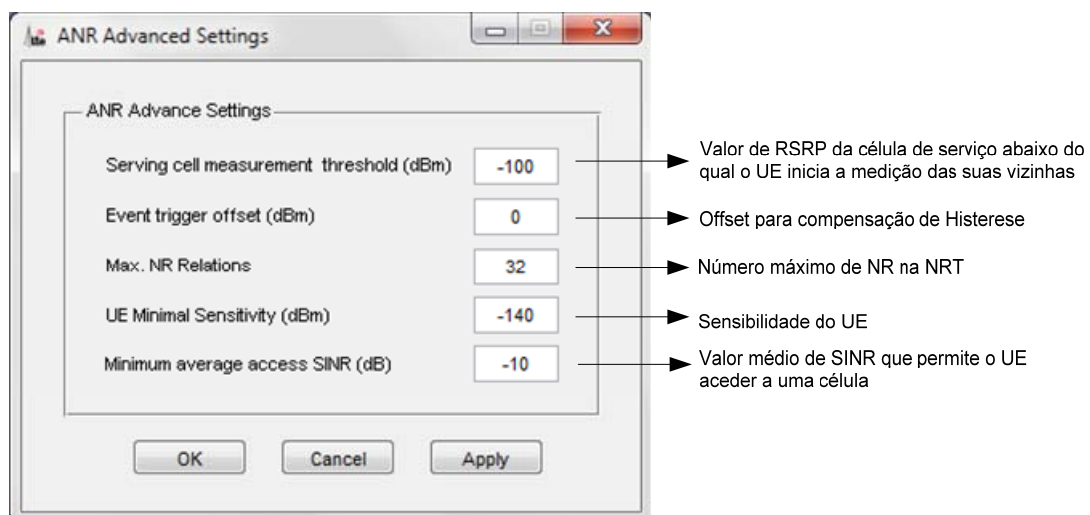



Figura 4.2 – ANR advanced settings.

B.5 Criação de Cenários

Nesta secção descreve-se o procedimento básico para criar um cenário para simulação.

B.5.1 Carregar Mapas

O procedimento seguinte ilustra os passos essenciais para carregar um mapa georreferenciado:

1. Na barra de ferramentas (Figura 3.6) ou a partir do menu "*File*" seleccione a opção para importar mapa;
2. Escolha uma imagem georreferenciada (Suporte apenas para ficheiros do tipo GeoTif);

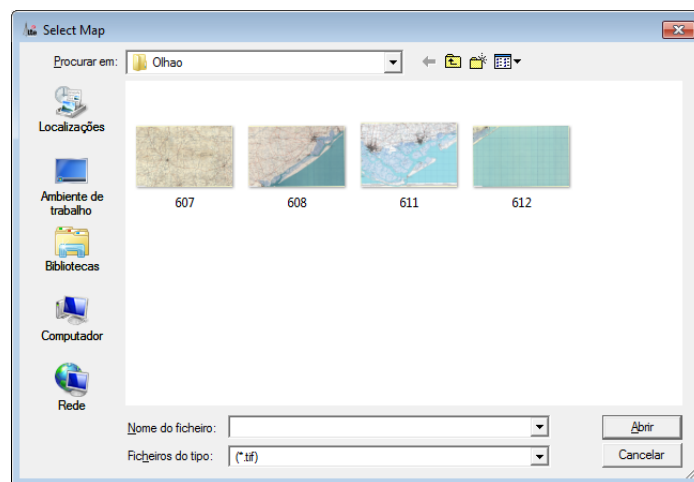



Figura 5.1 – Exemplo para a escolha de um mapa.

3. Utilize os botões "Pan" e "Zoom" da barra de ferramentas (Figura 3.6) para mover ou seleccionar uma região específica do mapa.

B.5.2 Criar eNodeB

O procedimento seguinte ilustra os passos essenciais para adicionar um novo eNodeB a um cenário:

1. Pressionar o botão "Add" no painel que contém a lista de eNodeB;
2. Fazer um clique apenas com o botão esquerdo do rato na localização no mapa onde se pretende colocar o novo eNodeB. Um novo formulário deverá aparecer;
3. No formulário insira os dados necessários. A Figura 5.2 descreve o significado de cada campo.

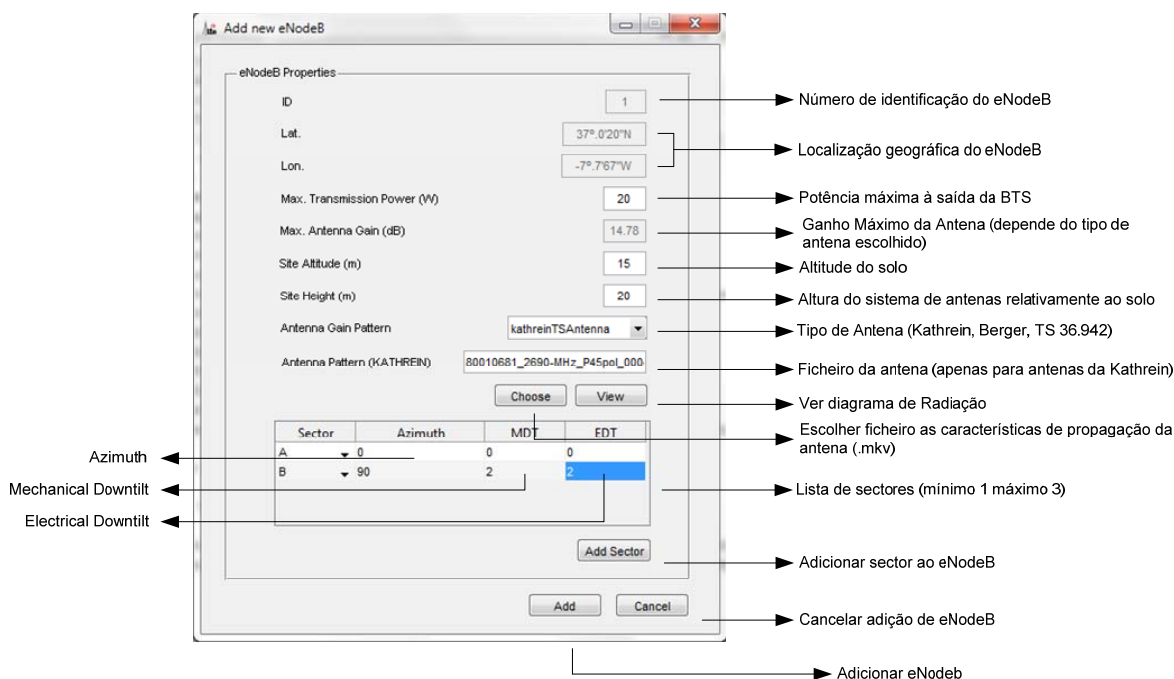



Figura 5.2 – Formulário para adicionar novo eNodeB.

4. Se desejar visualizar o diagrama de radiação da antena (Kathrein), seleccione “View” após escolher a localização do ficheiro (.msi) com as características da antena.

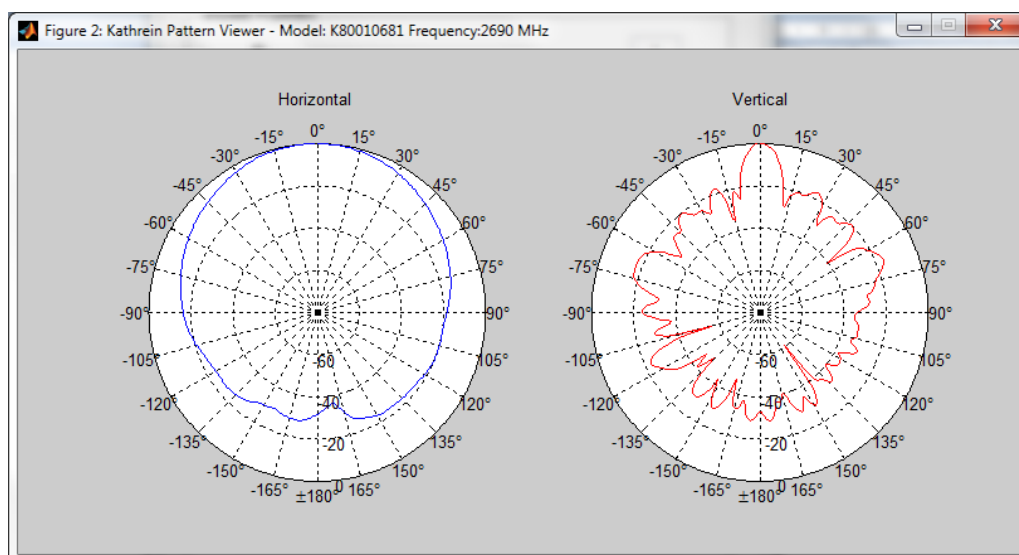



Figura 5.3 – Visualizador de diagramas de radiação (Exemplo para K 800.10681).

5. Pressione “Add” para concluir a adição do novo eNodeB.

B.5.3 Definir Cenário

Uma vez definidos os eNodeB, verifique as configurações gerais. A memória e o tempo de simulação necessários são dependentes da duração da simulação (TTI), número de

utilizadores, complexidade do canal (modelo de propagação, tipo de transmissão), resolução do mapa e funções de optimização.

B.5.4 Definir Região de Interesse

Para minimizar o tempo de simulação e tornar a distribuição dos utilizadores mais eficiente, o utilizador pode definir manualmente os limites da ROI (Region Of Interest) utilizando a função existente na barra de ferramentas (Figura 3.6).

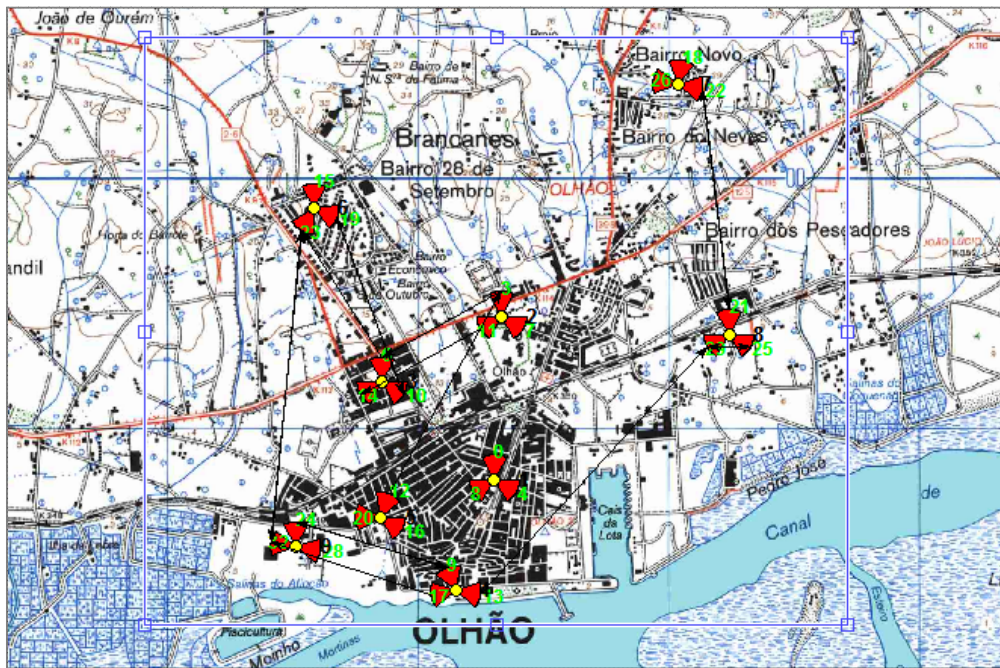



Figura 5.4 – Definição manual da ROI.

B.5.5 Guardar Cenário

Em qualquer altura, o estado do projecto poderá ser guardado usando as opções disponíveis no menu “*File*” ou utilizando a barra de ferramentas. Nota que o tamanho de cada projecto depende da complexidade e tempo de simulação do mesmo.

B.6 Análise de Resultados

Após cada simulação, o utilizador poderá consultar os resultados obtidos através da opção “Results” disponível no menu principal. Segue-se uma descrição das opções disponíveis.

B.6.1 Sector Boundaries

B.6.1.1 In Map

Esta opção permite visualizar a atribuição de sectores sobreposta no mapa.

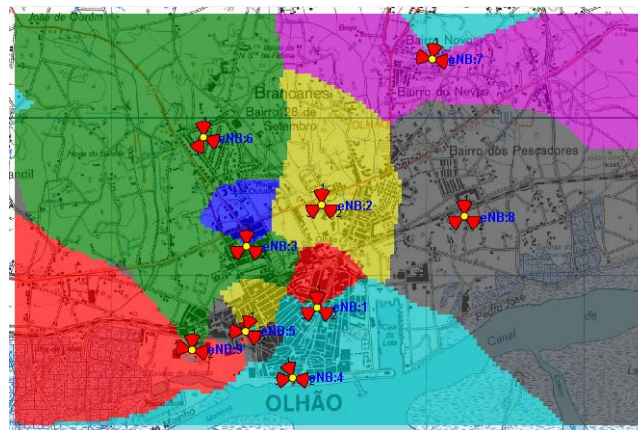



Figura 6.1 – Alocação e sectores com sobreposição no mapa.

B.6.1.2 In Figure

Esta opção permite visualizar a atribuição de sectores através de uma figura que é gerada à parte.

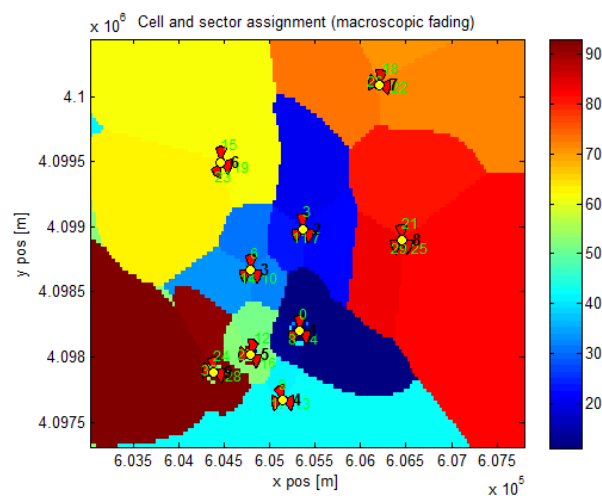



Figura 6.2 – Alocação de sectores em figura separada.

B.6.2 Signal Level

B.6.2.1 In Map

Esta opção permite visualizar o nível de sinal recebido através da sua sobreposição no mapa.

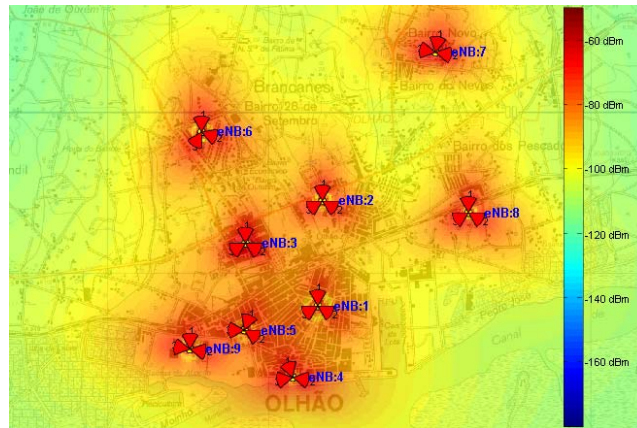



Figura 6.3 – Nível de sinal recebido com sobreposição no mapa.

B.6.2.2 In Figure

Esta opção permite visualizar o nível de sinal recebido através de uma figura gerada à parte.

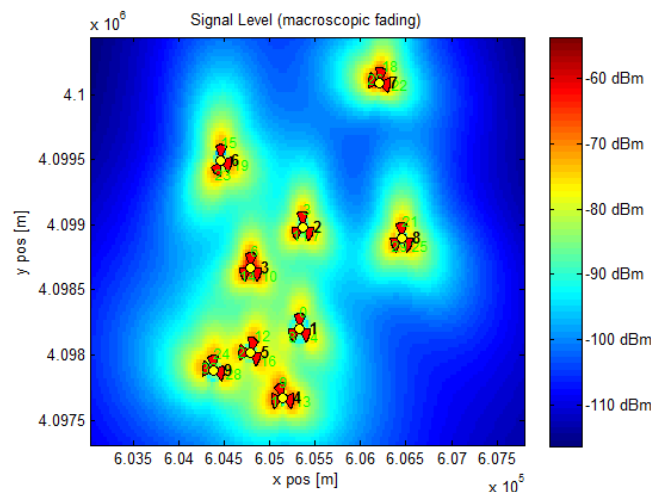



Figura 6.4 – Nível de sinal recebido em figura separada.

B.6.3 Alocação de PCI

B.6.3.1 In Map

Esta opção permite visualizar a atribuição de PCI final (após simulação) sobreposta no mapa.

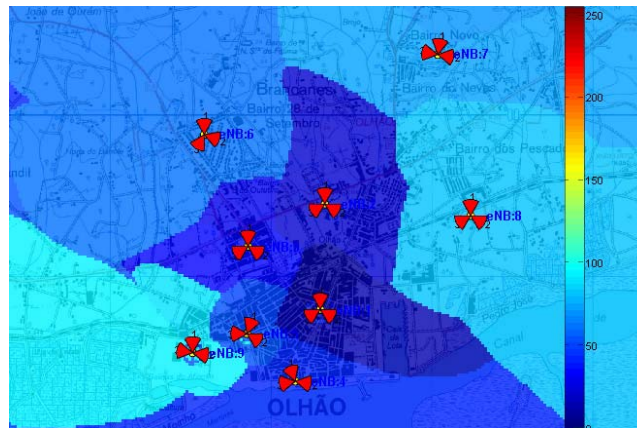



Figura 6.5 – Alocação de PCI com sobreposição no mapa.

B.6.3.2 In Figure

Esta opção permite visualizar a atribuição de PCI através de uma figura gerada à parte.

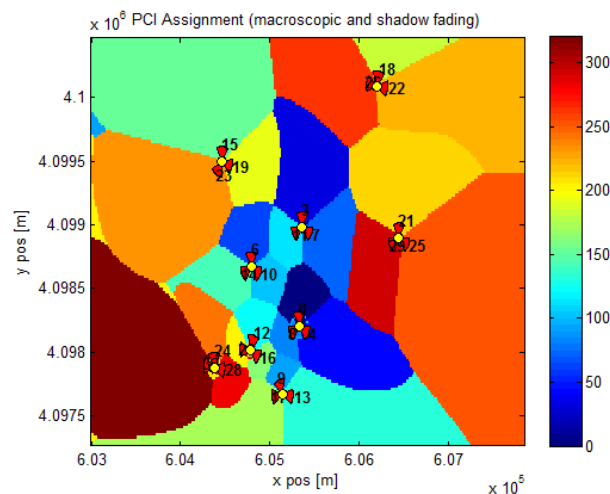
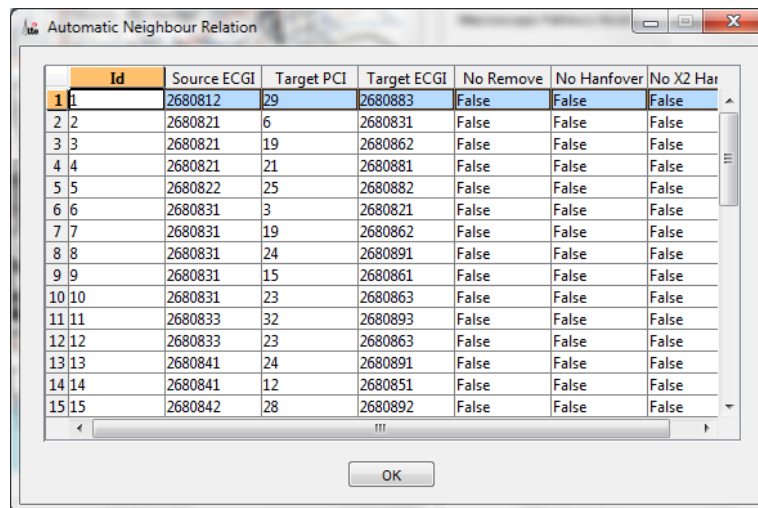



Figura 6.6 – Alocação de PCI em figura separada.

B.6.4 Neighbour

B.6.4.1 Neighbour Relation

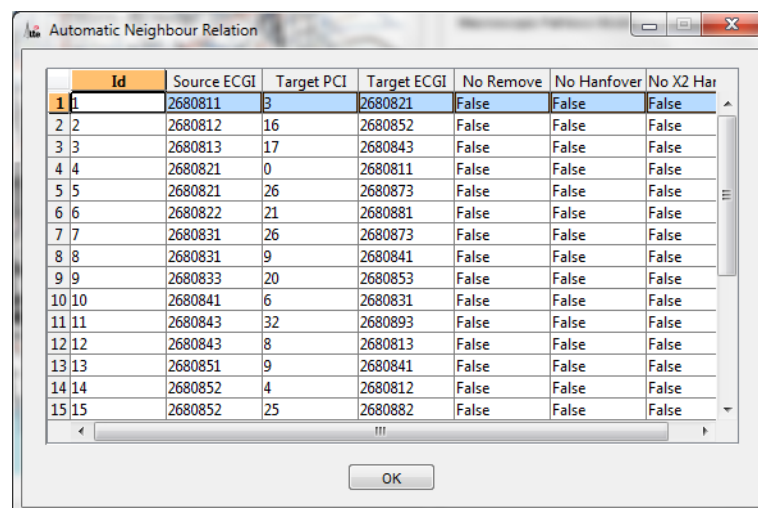
Esta opção permite obter uma listagem das relações vizinhança após simulação. Nota que, a listagem obtida corresponde ao estado final das tabelas de relações vizinhança e não incluem relações que possam ter sido removidas previamente.

	Id	Source ECGI	Target PCI	Target ECGI	No Remove	No Hanfover	No X2 Har
1	1	2680812	29	2680883	False	False	False
2	2	2680821	6	2680831	False	False	False
3	3	2680821	19	2680862	False	False	False
4	4	2680821	21	2680881	False	False	False
5	5	2680822	25	2680882	False	False	False
6	6	2680831	3	2680821	False	False	False
7	7	2680831	19	2680862	False	False	False
8	8	2680831	24	2680891	False	False	False
9	9	2680831	15	2680861	False	False	False
10	10	2680831	23	2680863	False	False	False
11	11	2680833	32	2680893	False	False	False
12	12	2680833	23	2680863	False	False	False
13	13	2680841	24	2680891	False	False	False
14	14	2680841	12	2680851	False	False	False
15	15	2680842	28	2680892	False	False	False

Figura 6.7 – Lista das relações vizinhança após simulação.

B.6.4.2 Removed Neighbour

Esta opção permite obter uma listagem de relações vizinhança que foram removidas durante a simulação.

	Id	Source ECGI	Target PCI	Target ECGI	No Remove	No Hanfover	No X2 Har
1	1	2680811	3	2680821	False	False	False
2	2	2680812	16	2680852	False	False	False
3	3	2680813	17	2680843	False	False	False
4	4	2680821	0	2680811	False	False	False
5	5	2680821	26	2680873	False	False	False
6	6	2680822	21	2680881	False	False	False
7	7	2680831	26	2680873	False	False	False
8	8	2680831	9	2680841	False	False	False
9	9	2680833	20	2680853	False	False	False
10	10	2680841	6	2680831	False	False	False
11	11	2680843	32	2680893	False	False	False
12	12	2680843	8	2680813	False	False	False
13	13	2680851	9	2680841	False	False	False
14	14	2680852	4	2680812	False	False	False
15	15	2680852	25	2680882	False	False	False

Figura 6.8 – Lista de relações vizinhança removidas durante simulação.

B.6.4.3 Neighbour Counters

Esta opção permite obter uma listagem dos contadores de *handover* indicando o número de *handover* realizados com sucesso e os falhados em cada célula.

Automatic Handover Realtion Statistics

	Id	Source ECGI	Source eNB	Source Sector	Target ECGI	Target eNB	Target S
1	1	2680811	1	1	2680812	1	2
2	2	2680811	1	1	2680822	2	2
3	3	2680811	1	1	2680813	1	3
4	4	2680811	1	1	2680823	2	3
5	5	2680811	1	1	2680881	8	1
6	6	2680811	1	1	2680841	4	1
7	7	2680811	1	1	2680832	3	2
8	8	2680812	1	2	2680811	1	1
9	9	2680812	1	2	2680842	4	2
10	10	2680812	1	2	2680852	5	2
11	11	2680812	1	2	2680813	1	3
12	12	2680813	1	3	2680841	4	1
13	13	2680813	1	3	2680892	9	2
14	14	2680813	1	3	2680851	5	1
15	15	2680813	1	3	2680811	1	1

OK

Figura 6.9 – Contadores de handover.

B.6.4.4 Handover Chart

Esta opção permite visualizar graficamente a evolução do número de tentativas e número de falhas de *handover*, em média, em função do TTI.

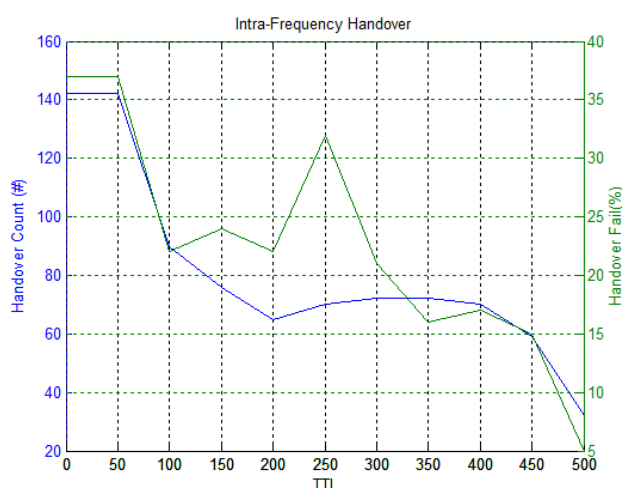



Figura 6.10 – Handover intra-frequência (número de handover vs número de handover falhados) em função do TTI.

B.6.5 Handover

B.6.5.1 Handover Oscillation Rate Chart

Através desta opção o utilizador poderá verificar a evolução da taxa de oscilação de *handover* em função do TTI.

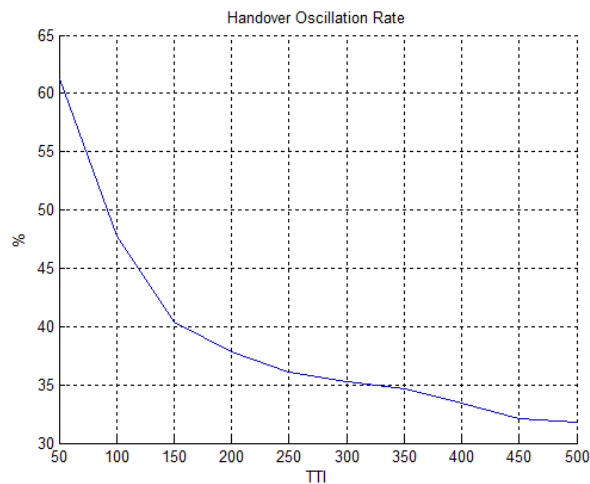



Figura 6.11 – Oscilação de handover em função do TTI.

B.6.5.2 Handover Oscillation Rate Counters

Através desta opção o utilizador poderá consultar a taxa de oscilação de *handover* registada em cada célula em função do TTI.

	eNodeB	Sector	HO Count	HPIHPP (Avg.)
1	1	1	9	55.5556
2	1	2	20	10
3	1	3	6	16.6667
4	2	1	71	63.3803
5	2	2	33	45.4545
6	2	3	19	31.5789
7	3	1	36	25
8	3	2	19	31.5789
9	3	3	15	13.3333
10	4	1	20	25
11	4	2	43	6.9767
12	4	3	14	42.8571
13	5	1	21	57.1429
14	5	2	36	11.1111
15	5	3	18	27.7778
16	6	1	26	23.0769

Figura 6.12 – Oscilação de handover por célula.

B.6.5.3 Optimized Handover Parameters

Através desta opção o utilizador poderá consultar os parâmetros de *handover* optimizados após simulação.

Optimized Handover Parameter

	eNodeB	Sector	Before Hysteresis ...	After Hysteresis ...	Before TTT (TTI)	After TTT (TTI)
1	1	1	3	1.9833	3	12
2	1	2	3	2.2786	3	12
3	1	3	3	1.9868	3	12
4	2	1	3	4.9708	3	1
5	2	2	3	2.728	3	12
6	2	3	3	1.9813	3	12
7	3	1	3	2.8967	3	12
8	3	2	3	2.2335	3	12
9	3	3	3	1.9845	3	12
10	4	1	3	2.2335	3	12
11	4	2	3	3.332	3	12
12	4	3	3	1.9868	3	12
13	5	1	3	2.1459	3	12
14	5	2	3	2.728	3	12
15	5	3	3	1.9845	3	12

OK

Figura 6.13 – Parâmetros de handover optimizados para cada célula.

B.6.6 Physical Cell Id

B.6.6.1 Inibid Users Chart

Através desta opção o utilizador poderá consultar um gráfico do número e percentagem de utilizadores bloqueados em função do TTI.

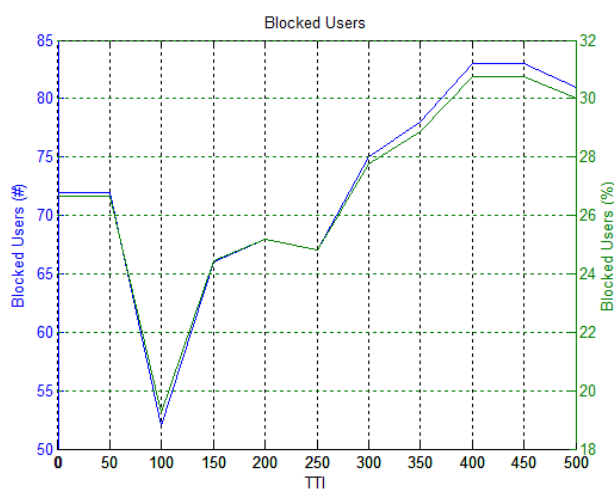



Figura 6.14 – Utilizadores bloqueados (número e percentagem de utilizadores bloqueados em função do TTI) em função do TTI.

B.6.6.2 Resolution Chart

Através desta opção o utilizador poderá consultar um gráfico com a média de *handover* e resoluções de conflitos de PCI, a cada 50 TTI, em função do TTI.

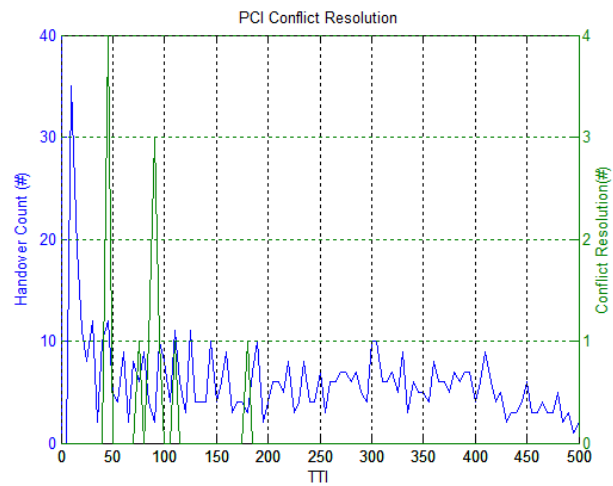



Figura 6.15 – Resolução de conflitos de PCI (número médio de ocorrências vs número médio de handovers) em função do TTI.

B.7 Problemas Conhecidos

Ao longo do desenvolvimento desta aplicação foram identificados problemas que poderão surgir durante a sua utilização. Segue-se uma descrição dos problemas identificados.

B.7.1 Desempenho

Sempre que são gerados gráficos de cobertura, alocação de célula ou alocação de PCI sobrepostos com o mapa, o desempenho da aplicação degrada-se significativamente. Esta situação só é resolvida quando o mapa é limpo.

B.7.2 Interface Gráfica

Durante a fase de testes foram identificadas situações onde após algumas simulações a tabela de eNodeB deixa de funcionar correctamente. Durante esta situação poderão ocorrer erros (*Java*) na consola do Matlab®. Após esta ocorrência o utilizador fica impossibilitado de remover ou editar eNodeB já existentes. As restantes funcionalidades da aplicação não são afectadas. Este problema só é possível de resolver reiniciando a aplicação.

Anexo C

LTE Link Budget

C.1 Link Budget LTE

LTE Downlink Radio Link Budget

General Parameter	Bandwidth	*A = user input*	5	MHz
	Carrier Frequency	*B = user input*	2600	MHz
	Sub-Carrier Spacing	*C = user input*	15	KHz
	Number of RB	*D = user input*	25	

Criteria	Require SNR	*E = user input*	6	dB
	Average TX PWR	*F = user input*	43	dBm

			Downlink	**Unit**
Transmitter	Total Power Per Cell	*G = F*	43	dBm
			19,95	W
			13	dBW
	Channel Power Offset	*H = user input*	0	dB
	BW for Maximum Power	*I = 10*Log10(A*10^6)*	66,99	dB-Hz
	Power Per Sub-Carrier	*J = G + 10*Log10((C*10^3)/(A*10^6)) + H*	17,77	dBm
	Max. Antenna Gain	*K = user input*	15	dBi
			12,85	dB
	Antenna Diversity Gain	*L = user input*	0	dB
	Feeder Loss (Combiner, Cable, Connector, etc.)	*M = user input*	3	dB
	ERP	*N = J + M + K*	29,77	dBm

Receiver	Receiver noise figure	*O = user input*	9	dB
	Thermal noise	*P = user input*	-174	dBm
	Receiver noise floor	*Q = P + 10*Log10(C*10^3) + O*	-123,24	dBm
	Required SINR	*R = E*	-10	dB
	Receiver sensitivity	*S = Q+R*	-133,24	dBm

Channel	RX Antenna Gain	*T = user input*	0	dBi
	UE Losses	*U = user input*	0	dB
	Receiver Gain & Losses	*V = user input*	0	dB
	Cell Edge Reliability	*W = user input*	95%	
	Frequency Diversity	*X = user input*	0	dB
	Log Normal Fading	*Y = user input*	8	dB
	Building Penetration	*Z = user input*	10	dB
	Building Penetration St. Dev.	*A' = user input*	8	dB
	Body Loss	*B' = user input*	9	dB
	St. Dev.	*C' = RAIZQ(Y^2+A'^2)*	11,31	dB
	BPL	*D'= -NORMINV(W,B'+A',Y)*	-32,16	dB

Path Losses	Pathloss at Cell Border	*E' = N+X-S+V+D'*	130,85	dB
	Maximum Alowed Path Loss (MAPL)	*F' = E'-D'*	163,01	dB

C.2 Cálculo do Raio de Célula

C.2.1 Cenário Urbano Denso

Cell Radius Calculation - Urban Dense

	Parameter	Formula	Downlink	Unit
COST231 - Urban Dense (Input Parameter)	h_base	*A = Simulator Model Input*	12,5	m
	h_ms	*B = Simulator Model Input*	1,5	m
	d_min	*C = Simulator Model Input*	20	m
	h_roof	*D = Simulator Model Input*	12	m
	w	*E = Simulator Model Input*	25	m
	b	*F = Simulator Model Input*	50	m
	phi	*G = Simulator Model Input*	30	deg
	delta_hmobile	*H = D-B*	10,5	m
	delta_hbase	*I = A-D*	0,5	m
	L_ori	*J = IF(AND(0 <= G;G < 35);-10 + 0,354*G;IF(AND(35 <= G;G < 55);2,5 + 0,075*(G - 35);IF(AND(55 <= phi;phi < 90);4 - 0,114*(G - 55);IF(AND(55 <= phi;phi < 90);4 - 0,114*(G - 55)))))*	0,62	
	L_bsh	*LK= IF(A > D;-18*LOG10(1 + I);0)*	-3,17	
	k_a	*L= IF(A > D;54;IF(AND(Q >= 0,5;A <= D);54 - 0,8*E11;IF(AND(Q< 0,5;A<= D);54 - 0,8*I*Q/0,5)))*	54	
	k_f	*M = -4 + 1,5*(Q/925 - 1)*	-1,28	
	k_d	*N = Simulator Model Input*	18	

	Parameter	Formula	Downlink	Unit
Maximum Cell Radius	Lb	*O = Link Budget*	163,01	dB
	Carrier Frequency	*P = Link Budget*	2600	MHz
	Max. Cell Radius (Phi=30)	*Q = (10^((A-15,5-20*LOG10(Q)+10*LOG10(F)-10*LOG(Q)-20*LOG10(I)-K-L-M-N*LOG10(Q)+9*LOG10(G))/(20+O)))*1000*	1512,49	m

C.2.2 Cenário Urbano

Cell Radius Calculation - Urban

	Parameter	Formula	Downlink	Unit
COST231 - Urban (Input Parameter)	L	*A=input*	163,01	dB
	f	*B=input*	2600	MHz
	Cm	*C=input*	3	
	h_base	*D=input*	32	m
	h_mobile	*E=input*	1,5	m
	d_min	*F=input*	35	m
	a	*G=(1,1*LOG10(B)-0,7)*E-(1,56*LOG10(B)-0,8)*	0,06	

	Parameter	Formula	Downlink	Unit
Maximum Cell Radius	Lb	*H*	163,01	dB
	Cell Radius	*I= 10^((A-46,3-33,9*LOG10(B)+13,82*LOG10(D)+G-C)/((44,9 - 6,55*LOG10(D))))*	3440,43	m

C.2.3 Cenário Suburbano

Cell Radius Calculation - Suburban				
			Downlink	**Unit**
COST231 - Sub Urban (Input Parameter)	Cm	*C = Simulator Model Input*	0	
	h_base	*D = Simulator Model Input*	32	m
	h_ms	*E = Simulator Model Input*	1,5	m
	d_min	*F = Simulator Model Input*	35	m
	a	*G=(1,1*LOG10(B)-0,7)*E-(1,56*LOG10(B)-0,8)*	0,06	dB
Maximum Cell Radius	L	*A = Link Budget*	163,01	dB
	f	*B = Link Budget*	2600	MHz
	Cell Radius	*I= 10^((A-46,3-33,9*LOG10(B)+13,82*LOG10(D)+G-C)/((44,9 - 6,55)*LOG10(D))))*	4190	m

C.2.4 Cenário Rural

Cell Radius Calculation - Rural				
			Downlink	**Unit**
TS 36.942 - Rural (Input Parameter)	Hb	*A= Simulator Model Input*	45	
Maximum Cell Radius	L	*B = Link budget*	163,01	dB
	f	*C= Link Budget*	2600	MHz
	Cell Radius	*D = 10^((69,55+26,16*LOG10(C)-13,82*LOG10(A)-4,78*(LOG10(C)^2)+18,33*LOG10(C)-40,94-E5)/((-44,9+6,55)*LOG10(A)))*	9180	m

[EgDu10] Egan, K., Duvall, J., "*Mobile data traffic surpasses voice*", ERICSSON Press Release, March 23, 2010.

[TS36300] 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall description; Stage 2 (Release 10), 2010.

[3GPP04] 3GPP TSG RAN Future Evolution Work Shop, Toronto, Canada, Compendium of Abstracts, 2004.

[TR25913] 3GPP TR 25.913, Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 9), 2009.

[ShSo11] Shen, J., Song, L., "*Envolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*", CRC Press, 2011, ISBN 978-1-4398-0649-4.

[3GPP06] 3GPP, UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE), 2006.

[SeTo09] Sesia S., Toufik I., Baker M., "*LTE, The Long Term Evolution, From Theory to Practise*", John Wiley & Sons Ltd., 2009, ISBN: 978-0-470-69716-0.

[LuSc05] Schulze, H., Luders, C, "*Theory and Applications of OFDM and CDMA, Wideband Wireless Communications*", John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0-470-85069-5.

[HoTo09] Holma, H., Toskala, A., "*LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*", John Wiley & Sons Ltd, 2009, ISBN: 978-0-470-99401-6.

[TS36321] 3GPP TS 36.321, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 9), 2009.

[LeFr08] Lehser, F.,"*Next Generation Mobile Networks Use Cases related to Self Organising Network, Overall Description*", Next Generation Mobile Network (NGMN) Technical Working Group "Self Organising Networks", Project 12", 2008.

[NNJT10] Marchetti N., Prasad, N., Johansson, J., Cai, T., "*Self-Organizing Networks:State-of-the-Art, Challenges and Perspectives*", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.

[SOCR08] Scully, N., Thiel, S., Litjens, R., Jorguseski, L., Nascimento, R., Linnell, O., Zetterberg, O., Amirijoo, M., Blondia, C., Spaey, K., Moerman, I., Balan, I., Kürner, T., Hecker, A., Jansen, T., Oszmianski, J., Schmelz, L., "*Use Cases for Self-Organising Networks*", INFSO-ICT-216284 SOCRATES D2.1, 2008.

[TS32521] 3GPP TS 32.521, Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Requirements (Release 9), 2010.

[Lehe08] Leher, F., "*Next Generation Mobile Networks Recommendation on SON and O&M Requirements*", NGMN Alliance, 2008.

[AmFr08] Amirijoo, M., Frenger, P., Gunnarsson, F., Kallin, H., Moe, J., Zetterberg, K., *"Neighbor Cell Relation List and Physical Cell Identity Self-Organization in LTE"*, Wireless Acess Networks, Ericsson Research, Ericsson AB, Sweden, 2008.

[KiHo10] Kim, D., Bongjhim, S., Hong, D., Lim, J., "*Self-Configuration of Neighbor Cell List Utilizing E-UTRAN NodeB Scanning in LTE Systems*", Department of Electronic Engineering, Sogang University, Korea.

[FeSe08] Feng, S., Seidel, E., "*Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution*", Nomor Research GmbH, 2008.

[TR36902] 3GPP TR 36.902, Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions (Release 9), 2010.

[Gray09] Graybeal, J., "*The Benefits of SON in LTE - Self-Optimizing and Self-Organizing Networks*", 3G Americas, 2009.

[Syed09] Syed, A., "*Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tools, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution*", Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology, 2009.

[TS36304] 3GPP TS 36.304, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode (Release 8), 2008.

[John10] Johnson, C., "*Long Term Evolution IN BULLETS*", Chris Johnson, 2010.

[LLZY10] Liu, Y., Li, W., Zhang, H., Yu, L., "*Distributed PCI assignment in LTE based on consultation mechanism*", State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, IEEE, 2010.

[LLZW10] Liu, Y., Li, W., Zhang, H., Lu, W.,"*Graph based automatic centralized PCI assignment in LTE*", State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, IEEE, 2010.

[AFGH08] Amirijoo, M., Frenger, P., Gunnarsson, F., Kallin, H., Moe, J., Zetterberg, K., "*Neighbor Cell Relation List and Physical Cell Identity Self-Organization in LTE*" ICC'08, IEEE, 2008.

[TIJI10] T. Jansen, I. Balan, J. Turk, I. Moerman, T. K¨urner, "*Handover parameter optimization in LTE self-organizing networks*", Technische Universit¨at Braunschweig, Braunschweig, Germany, Interdisciplinary Institute for Broadband Technology, Ghent, Belgium, Vodafone Group, Newbury, England, 2010.

[IWRu10] Ikuno, J., Wrulich, M., Rupp, M., "*System level simulation of LTE networks*", Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology, Austria, 2010.

[MeIk11] Mehlfuhrer, C., Ikuno, J., "*Vienna LTE Simulators System Level Simulator Documentation, v1.3r427*", Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology, Austria Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria, 2011, http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator.

[HoTo07] Holma, H., Toskala, A., "WCDMA for UMTS – HSDPA Evolution and LTE, fourth edition"; John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

[LGKi10] Doo-Won Lee, Gye-Tae Gil,2 and Dong-Hoi Kim1, "*A Cost-Based Adaptive Handover Hysteresis Scheme to Minimize the Handover Failure Rate in 3GPP LTE System*", EURASIP Journal onWireless Communications and Networking, Hyunggon Park, 2010.

[Rapp02] Rappaport, T., "*Wireless Communications - Principles and Practise*", Prentice Hall PTR, 2002, ISBN: 0-13-042232-0.

[TS36942] 3GPP TR 36.942, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 10), 2010.

[MISM11] Mehlfuhrer, C, Ikuno, C., Simko, M., Schwarz, S., Wrulich, M., Rupp, M, *"The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research*", Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology, Austria, 2011.

[MWIBR09] Mehlfuhrer, C., Wrulich, M., Ikuno, J., Bosanska, D., Rupp, M., "*Simulating The Long Term Evolution Physical Layer*", Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria, 2009.

[AFGM09] Amirijoo, M., Frenger, P., Gunnarsson, Moe, J., Zetterberg, K., "*On Self-Optimization of the Random Access Procedure in 3G Long Term Evolution*", ERICSSON Research AB Sweden, 2009.

[RRFo08] Racz, A.; Reider, N.; Fodor, G., "*On the Impact of Inter-Cell Interference in LTE*", Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, 2008.